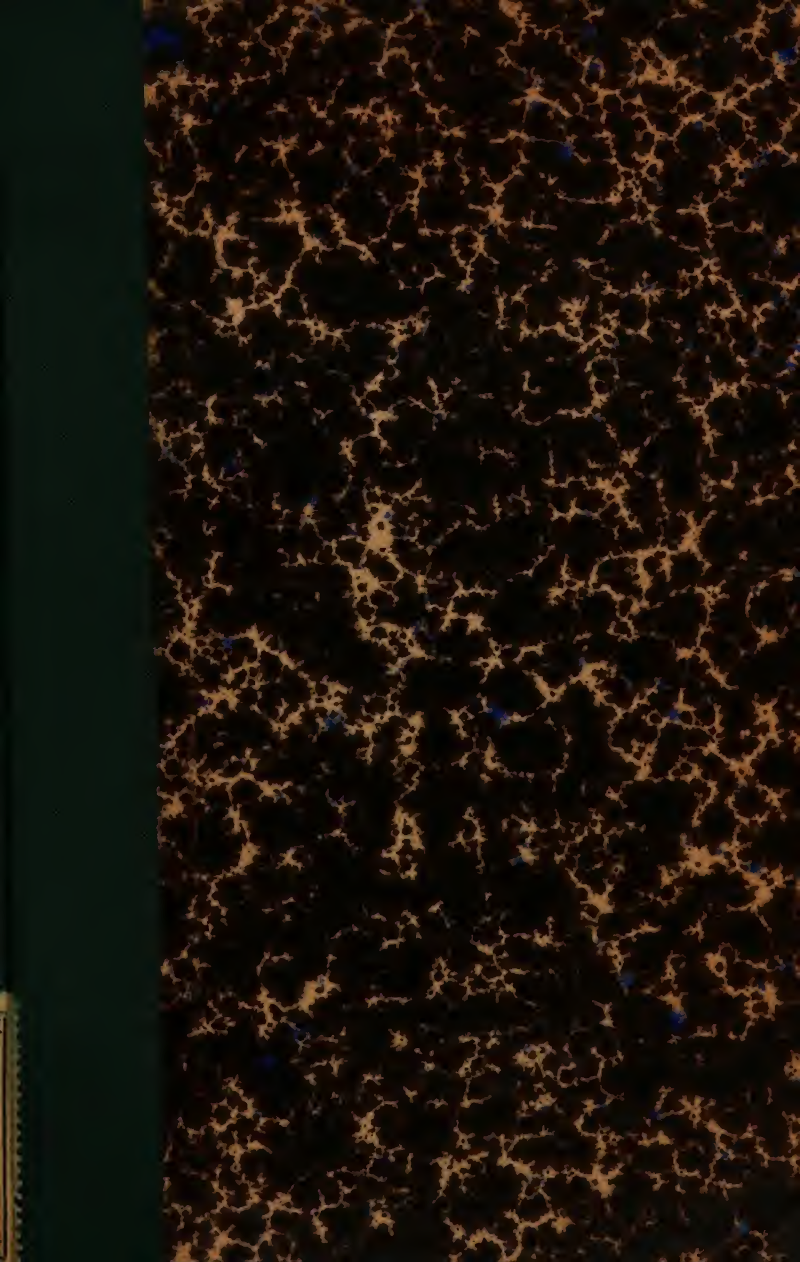


AZZO DELLE SCIENZE
LEGATORIA
DI LIBRI
CESARE SARROCCHI
A LUNGARA 10

Digitized by Google

# LEÇONS

DE

# PHYSIQUE

## A L'USAGE DES DEMOISELLES

PAR

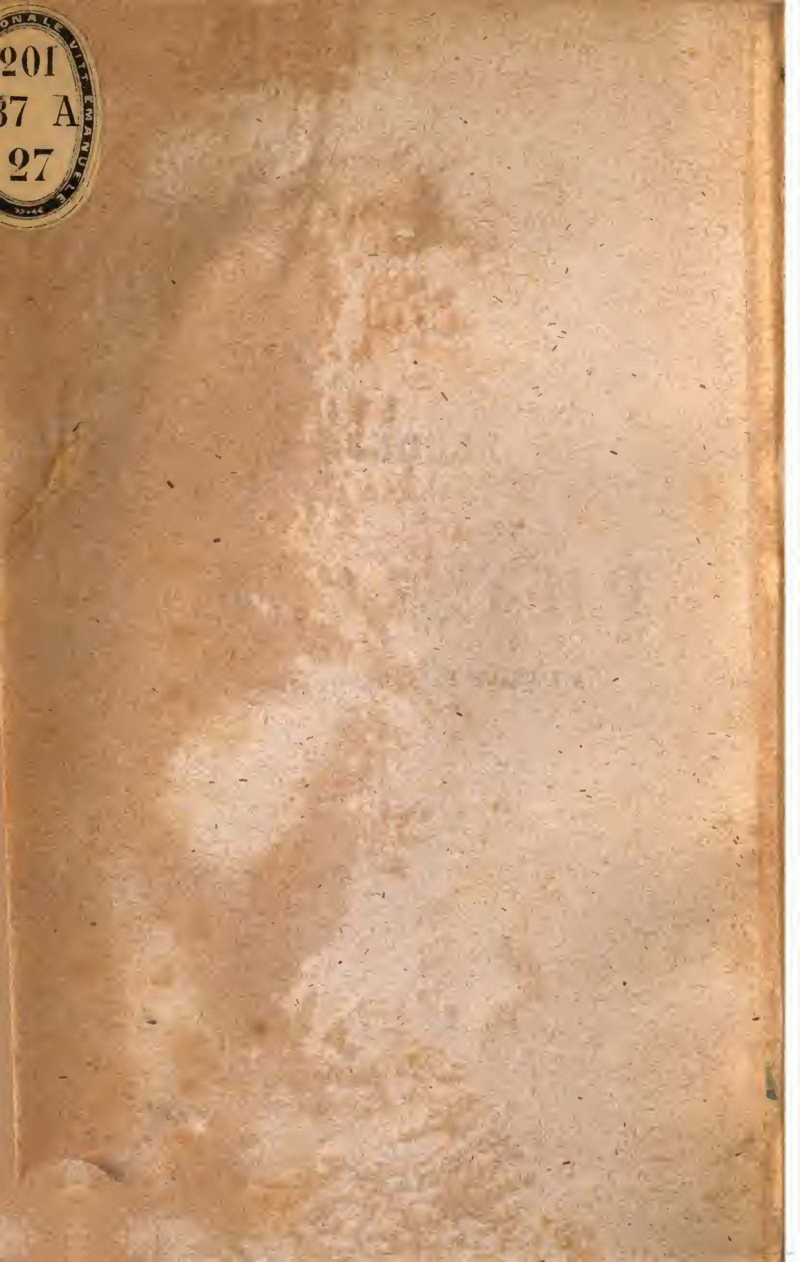
**PAUL POIRÉ**

Ancien élève de l'École normale, Agrégé de l'Université,
Professeur de physique et de chimie
au Lycée national et aux Cours communaux d'Amiens

OUVRAGE ORNÉ DE 365 FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE

DEUXIÈME ÉDITION

PARIS
CH. DELAGRAVE ET C^IE, LIBR.-ÉDITEURS
58, RUE DES ÉCOLES, 58


201
37 A
27

# LEÇONS

DE

# PHYSIQUE

A L'USAGE DES DEMOISELLES

*Toutes nos éditions sont revêtues de notre griffe.*

Charles Delagrave et Cie

DU MÊME AUTEUR

**LEÇONS DE CHIMIE** à l'usage des industriels, des écoles normales primaires, des établissements d'instruction primaire supérieure, des écoles professionnelles, des candidats au brevet de capacité, etc. 2e édit. 1 fort volume in-18 jésus, avec figures dans le texte, broché. . . . . 4 50

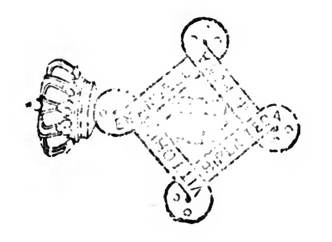
**LEÇONS DE CHIMIE** à l'usage des élèves de la classe de philosophie et des candidats au baccalauréat ès lettres. 1 vol. in-18 jésus, avec figures dans le texte, broché. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 2 »

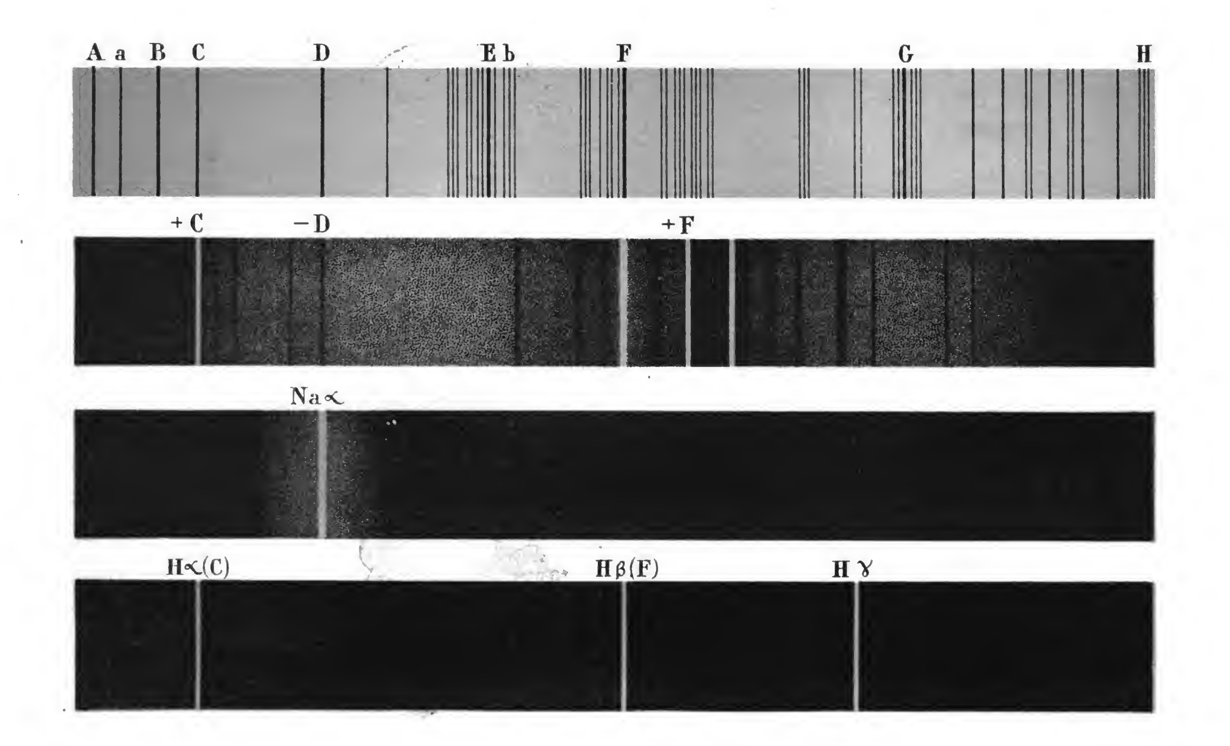
**LEÇONS DE PHYSIQUE** à l'usage des écoles normales primaires, des établissements d'instruction primaire supérieure, des écoles professionnelles, des candidats au brevet de capacité, etc. 3e édit. 1 vol. in-18 jésus, avec figures dans le texte, broché. . . . . . . . . . . . 4 »

**LEÇONS DE CHIMIE** appliquée aux arts, à l'hygiène et à l'économie domestique, à l'usage des demoiselles. 1 vol. in-18 jésus, avec fig. » »

---

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.





A a B C D E b F G H
+C −D +F
Naα
Hα(C) Hβ(F) Hγ

# LEÇONS

DE

# PHYSIQUE

## A L'USAGE DES DEMOISELLES

PAR

**PAUL POIRÉ**

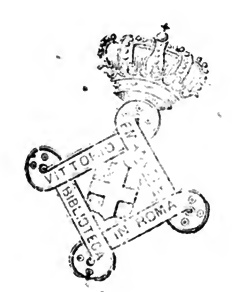
Ancien élève de l'École normale, Agrégé de l'Université,
Professeur de physique et de chimie
au Lycée et aux Cours communaux d'Amiens

---

**OUVRAGE ORNÉ DE 383 FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE**

---

TROISIÈME ÉDITION



PARIS

CH DELAGRAVE ET C^IE, LIBRAIRES-ÉDITEURS

58, RUE DES ÉCOLES, 58

---

1872

# PRÉFACE

Les sciences physiques ont pris, depuis le commencement de ce siècle, un tel essor ; elles ont servi de point de départ à tant d'applications fécondes, à tant d'industries utiles, que leur étude ne peut plus rester le privilége de quelques-uns : elles doivent être vulgarisées et connues de tous.

Les femmes elles-mêmes, qu'on a eu le tort jusqu'ici de ne pas initier assez à la connaissance des grandes lois de la nature, doivent avoir leur part dans cet enseignement des sciences physiques. Là, comme ailleurs, il est nécessaire qu'elles acquièrent des connaissances qui leur permettent de participer davantage à l'éducation de leurs enfants et de mieux seconder ceux qui se vouent à l'enseignement de la jeunesse.

Combien de mères, à notre époque, et je parle des plus instruites et des plus intelligentes, qui sont obligées de rester muettes devant les questions d'un enfant, devant

ces questions qui révèlent tant de grâces naïves et mettent souvent en évidence un talent d'observation qui étonne ! La réponse cependant serait souvent bien facile pour celles qui auraient étudié les éléments des sciences.

Combien de femmes aussi pour lesquelles les lois les plus simples de l'hygiène et de l'économie domestique restent incomprises, parce qu'elles ignorent les principes qui leur servent de base !

Notre but, en rédigeant le double ouvrage que nous publions, a été de concourir pour notre faible part à cette œuvre de vulgarisation qui est une nécessité de notre époque.

Pour atteindre ce but, il faut enlever à la science ce qu'elle a de rude et d'austère, se rappeler souvent que, si les formes du langage scientifique sont nécessaires aux progrès, elles nuisent à la vulgarisation. Nous avons écarté de ces leçons tous les faits d'importance secondaire, restés usqu'ici sans application, pour ne porter l'attention que sur les principaux, et mieux faire ressortir de leur examen les grandes lois qui les résument et qui président avec tant d'harmonie au jeu des forces de la nature.

Nous avons toujours essayé de parler un langage que tous puissent facilement comprendre, sans rien perdre cependant de la rigueur et de la précision qui doivent être les premières qualités de tout ouvrage scientifique.

La plupart des applications pratiques ont été étudiées avec détail. Nous citerons :

En physique : le chauffage et la ventilation des appartements, les machines à vapeur, la galvanoplastie, la télégraphie électrique, la photographie, les instruments de musique.

En chimie : les propriétés de l'air, de l'eau, et leurs ap-

plications ; les procédés de blanchiment de la laine, de la soie, du lin et du coton ; l'étude du diamant et des principales variétés de charbon ; le gaz de l'éclairage ; le blanchissage du linge ; la fabrication des poteries, des porcelaines et du verre ; les propriétés des métaux utiles ; la fabrication du vinaigre, de l'amidon, du papier, du vin, de la bière, du cidre, des bougies, des savons, etc. ; l'étude du lait, du beurre et des conserves alimentaires.

P. POIRÉ.

---

Digitized by Google

# LEÇONS

# DE PHYSIQUE

---

## NOTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Les corps si nombreux et si variés que nous offre la nature sont soumis à des changements fréquents, que l'on désigne sous le nom de *phénomènes*, et qui peuvent être divisés en deux grandes classes. La première comprend ceux qui n'apportent dans l'état des corps que des modifications passagères, n'altèrent pas leur nature et cessent avec la cause qui les a produits : ce sont les phénomènes *physiques*. La seconde comprend ceux qui consistent en modifications apportées à la nature intime des corps et subsistant après la suspension de la cause qui leur a donné naissance : ce sont les *phénomènes chimiques*.

Si nous plaçons une barre de fer au milieu d'un foyer, elle s'échauffe, s'allonge et se dilate dans tous les sens. Laissons éteindre le feu, la barre de fer se refroidit peu à peu et revient à ses dimensions primitives.

Mettons, comme le font les étameurs, une certaine quantité d'étain dans une cuiller de fer posée sur des charbons ardents; sous l'influence de la chaleur, l'étain augmente de volume et finit par devenir liquide comme de l'eau. Enlevons la cuiller du

feu, laissons-la se refroidir, et l'étain retrouve, au bout d'un certain temps, son état primitif.

Agitons une sonnette, l'air calme et silencieux s'ébranle aussitôt et devient sonore. Arrêtons le mouvement : le son cesse avec lui et l'air revient au repos.

Ce sont là autant d'exemples de phénomènes physiques, car ils ont cessé avec la cause qui les avait produits, et n'ont pu apporter que des modifications passagères dans les propriétés des corps.

La barre de fer dont nous avons parlé étant abandonnée à l'action de l'air humide, nous la voyons, au bout d'un certain temps, se recouvrir de grains jaunâtres qui, se multipliant, finissent par envahir toute sa surface. Le fer s'est rouillé, s'est oxydé, et cette oxydation est due à la double influence de l'air et de l'humidité. Transportée dans un récipient sec et privé d'air, soustraite ainsi à la cause du phénomène qu'elle a subi, la barre conservera l'aspect qu'elle avait pris dans l'air humide : la rouille déjà formée continuera à recouvrir sa surface. Il y a eu là une modification dans la nature même du corps ; elle survit à la cause qui l'a produite, et nous fournit l'exemple d'un *phénomène chimique*.

Si, à l'air libre, nous prolongeons l'action du feu sur l'étain, nous le verrons se transformer peu à peu en une poudre grisâtre que l'on appelle oxyde d'étain et qui diffère essentiellement du corps qui lui a donné naissance. L'action du feu étant suspendue, l'oxyde d'étain subsiste et le métal ne se retrouve point. Nous avons encore ici tous les caractères d'un phénomène chimique. Il en est de même dans le changement subi par l'air d'une chambre, dont on ferme toutes les issues après y avoir abandonné un fourneau rempli de charbons incandescents. Au bout d'un certain temps, l'air qui, avant l'expérience, était capable d'entretenir la respiration des animaux et d'alimenter la combustion, a complétement changé de nature : les animaux y tombent asphyxiés, les bougies s'y éteignent.

La Physique est la science qui a pour but l'étude des phénomènes physiques, leur explication et la détermination des lois auxquelles ils obéissent. L'étude des phénomènes chimiques fait l'objet de la Chimie.

2. **État des corps.** — La matière qui forme tous les corps

peut affecter des états différents que l'on désigne sous le nom d'états *solide*, *liquide* et *gazeux*, et qui se distinguent par des propriétés caractéristiques. L'eau à l'état de glace est un corps solide ; elle coule dans nos fleuves à l'état liquide, et se trouve dans l'atmosphère à l'état de gaz ou de vapeur.

Nous reviendrons (chapitre II) sur les propriétés caractéristiques qui correspondent à chacun de ces états de la matière.

3. **Propriétés générales des corps.** — Les corps de la nature, malgré leur nombre et la variété de leur aspect, présentent un ensemble de caractères qui leur sont communs et que l'on désigne ordinairement sous le nom de *propriétés générales des corps*. Ce sont : l'étendue, l'impénétrabilité, la divisibilité, la porosité, la compressibilité, l'élasticité, la mobilité et l'inertie.

4. **Étendue. Impénétrabilité.** — Tout corps occupe dans l'espace une certaine place, et c'est en cela que consiste son étendue : mais cette place, il l'occupe à l'*exclusion* de tout autre, et c'est en cela que consiste son *impénétrabilité*.

Il est important de rapporter ici quelques phénomènes fort simples qui semblent, à un premier examen, contredire l'idée d'impénétrabilité de la matière, mais qui, examinés de plus près, ne font au contraire que la confirmer.

Lorsqu'on laisse tomber au milieu de l'eau un corps solide, tel qu'un caillou, il s'y enfonce et semble pénétrer le liquide. Cependant il n'a fait qu'en séparer les parties et les déplacer, car si l'on fait l'expérience dans un vase de verre terminé par un col étroit, on constate que le liquide s'est élevé dans le col par suite du déplacement qu'a opéré le caillou.

Il en est de même lorsque nous introduisons la lame d'un couteau dans un fruit, lorsque le menuisier scie une planche, lorsque le jardinier enfonce le fer de sa bêche dans le sol ; il n'y a dans tous ces exemples que division et séparation des parties ; mais il n'y a pas pénétration, dans le sens physique du mot.

5. **Divisibilité.** — La divisibilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être partagés en un nombre plus ou moins grand de parties. La nature nous offre de nombreux exemples de cette division de la matière, qu'elle pousse quelquefois presque jusqu'à l'infini.

On a peine à se figurer la ténuité des particules qui se détachent à chaque instant de certaines substances odorantes. Un grain de

musc abandonné dans un appartement, où l'air se renouvelle constamment, répand ses particules odorantes de toutes parts, et, au bout d'un an, la balance la plus sensible n'accuse pas de diminution dans son poids.

Certains liquides contiennent dans leur sein des animalcules tellement petits qu'il nous faut, pour les apercevoir, employer des microscopes d'un très-fort pouvoir grossissant ; et cependant chacun de ces animaux possède des organes servant à l'accomplissement de ses fonctions vitales ; chacun de ces organes est lui-même composé d'un nombre considérable de parties infiniment petites.

Sans pouvoir atteindre, par des opérations mécaniques, au degré de divisibilité dont ces exemples donnent l'idée, l'homme peut néanmoins arriver à des résultats dont nous signalerons les plus frappants.

Les feuilles d'or dont se servent les doreurs sont tellement minces qu'il faudrait en superposer vingt mille pour atteindre l'épaisseur d'un millimètre.

Wollaston est parvenu à fabriquer un fil de platine dont le diamètre était inférieur à $\frac{1}{1200}$ de millimètre ; il aurait fallu plus de 144 morceaux de ce fil juxtaposés pour constituer un faisceau qui eût la grosseur d'un fil de soie de cocon. Voici le moyen qu'il employa : il introduisit un fil de platine dans l'axe d'un moule cylindrique, coula autour du fil de l'argent fondu, et, après la solidification, passa le tout à la filière, c'est-à-dire à travers des trous de plus en plus petits percés dans l'épaisseur d'une plaque d'acier. Quand il eut ainsi diminué le diamètre du fil, au point que sa solidité ne pouvait plus se prêter à un nouveau passage à la filière, sans chance de rupture, il le plongea dans l'eau forte qui, dissolvant l'argent sans attaquer le fil de platine, mit ce dernier à nu.

Bien que pouvant être poussée très-loin, la divisibilité de la matière ne peut aller à l'infini, et nous appellerons *atomes* ou *molécules* les particules indivisibles, insécables, devant lesquelles nous supposerons qu'elle s'arrête.

6. **Porosité.** — La porosité consiste dans la propriété qu'ont les corps de présenter entre leurs molécules des interstices auxquels on donne le nom de *pores*.

Les corps qui en apparence sont les plus compacts et les

moins susceptibles de présenter des pores, jouissent cependant de la propriété que nous venons de définir.

Les métaux sont poreux : une expérience célèbre des académiciens de Florence l'a démontré pour l'or en 1661. Une sphère en or exactement remplie d'eau et fermée fut soumise à une pression considérable; la sphère se comprima, l'eau suinta à travers les pores du métal, et apparut à l'extérieur comme un dépôt de rosée.

Les peaux des animaux sont percées d'un grand nombre de pores. Que l'on prenne un morceau de peau de chamois, qu'on y verse du mercure, et qu'on en fasse ensuite un nouet; si l'on vient à presser le nouet, le mercure filtrera à travers la peau et s'échappera sous forme de pluie. Les pores que présente la peau des animaux servent à l'accomplissement d'actes importants, comme la transpiration, par laquelle l'animal se débarrasse de produits impropres à la nutrition.

7. **Compressibilité.** — Tous les corps, lorsqu'ils sont soumis à des pressions suffisantes, diminuent de volume, et c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils sont compressibles. C'est ainsi que les colonnes en fonte ou en pierre qui soutiennent nos édifices s'affaissent et se compriment sous le poids des parties qu'elles supportent.

Les liquides sont très-peu compressibles. On les a considérés longtemps comme incompressibles, mais Œrstedt [1] a démontré (42), qu'ils sont doués aussi de compressibilité. Quoi qu'il en soit, cette compressibilité est assez faible pour que dans les applications on puisse la considérer comme nulle.

Quant aux gaz, leur compressibilité n'a pour ainsi dire pas de limites. On peut la mettre en évidence par le *briquet à air.*

Soit (fig. 1) un tube en verre très-épais mastiqué dans une douille en cuivre qui le ferme à sa partie inférieure. Introduisons dans ce cylindre, par l'extrémité supérieure, un piston qui s'adapte parfaitement à l'ouverture. Nous enfermons ainsi un volume d'air égal au volume intérieur du tube. En appuyant sur la tige du piston, nous parviendrons à le faire descendre jusqu'à ce qu'il aille toucher la base inférieure du tube, le volume de l'air se trouvant presque réduit à zéro. Si l'expérience a été faite brusquement, la chaleur dégagée par cette compression suffira pour en-

[1] Œrstedt, physicien danois, né à Rudkiœbing en 1751, mort en 1851.

flammer un morceau d'amadou placé à la partie inférieure du piston, et c'est de là que l'appareil tire son nom de *briquet à air.*

8. **Élasticité.** — Lorsque les corps ont été comprimés ou déformés par une cause quelconque, ils peuvent revenir à leur forme primitive, et c'est là ce qui constitue la propriété qu'on a désignée sous le nom d'*élasticité.* Un corps qui, après la compression, reprendrait exactement sa figure primitive, serait *parfaitement élastique;* il ne l'est qu'imparfaitement s'il ne revient qu'imparfaitement à son premier état.

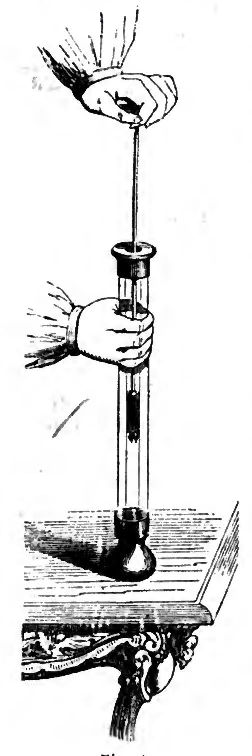


Fig. 1.

Lorsque d'une grande hauteur on laisse tomber une bille d'ivoire sur une plaque de marbre polie recouverte d'une couche de corps gras, la bille vient frapper le plan de marbre et rebondit à une certaine hauteur. On constate, après ce choc, que le corps gras a été enlevé suivant la surface d'un petit cercle, ce qui prouve que la bille s'est aplatie et a touché le marbre suivant la surface de ce petit cercle. Mais son élasticité la faisant brusquement revenir à sa forme primitive a produit ce qu'eût fait un ressort à boudin comprimé entre la bille et le marbre, elle l'a fait rebondir.

Il en est de même lorsque les enfants lancent une balle élastique contre un mur. C'est encore par l'élasticité des bandes d'un billard que l'on explique comment une bille qui vient les frapper est renvoyée dans une direction déterminée.

9. **Mobilité et inertie.** — La mobilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être transportés d'un lieu dans un autre.

Un corps ne se met jamais en mouvement de lui-même; s'il passe de l'état de repos à l'état de mouvement, c'est qu'une cause extérieure a agi sur lui. Cette cause est appelée *force.* Lorsqu'un

corps est en mouvement, il ne peut non plus modifier ce mouvement de lui même. Tout ralentissement, toute accélération dans sa marche est l'effet d'une force extérieure. Cette incapacité dans laquelle se trouvent les corps de ne pouvoir modifier en rien leur état de repos ou de mouvement a été désignée sous le nom d'*inertie*.

Bien des faits semblent tout d'abord en opposition avec cette définition; mais cependant ils rentrent dans la loi générale.

Nous n'en citerons que deux : une bille est lancée sur le tapis d'un billard ; si elle jouit de la propriété que nous venons d'appeler inertie, il semble qu'elle doive se mouvoir indéfiniment ; et cependant, à mesure qu'elle s'avance, nous la voyons marcher plus lentement et finir par s'arrêter. En effet, une double cause a agi sur elle pour diminuer d'abord et annuler ensuite sa vitesse; c'est la résistance de l'air et le frottement du tapis. L'air ne peut être pénétré par la bille en mouvement; pour que celle-ci s'avance, il faut qu'elle déplace les molécules gazeuses, qu'elle les refoule les unes sur les autres qu'elle partage sa vitesse avec elles. Si polie qu'elle soit, elle présente néanmoins des aspérités qui s'engagent dans celles que forment les filaments du tapis. Pour avancer sur la table du billard, il lui faut successivement courber devant elle tous ces filaments, leur communiquer par suite une partie de sa vitesse. Au bout d'un certain temps, cette double résistance a absorbé toute la vitesse du mobile et il s'arrête. Pour prouver l'influence du frottement, on peut, du reste, lancer la bille sur un plan de marbre bien poli, et la durée du mouvement deviendra incomparablement plus grande.

Si un corps abandonné à lui-même tombe, ce n'est pas qu'il ait été capable de passer, par sa propre spontanéité, de l'état de repos à celui de mouvement; c'est qu'il a été soumis à la force attractive qui dirige tous les corps vers le centre de la terre, force que nous étudierons plus tard sous le nom de *pesanteur*.

C'est encore la pesanteur qui modifie la vitesse d'un projectile lancé horizontalement. S'il n'était pas soumis à l'action de cette force et à la résistance de l'air, il continuerait indéfiniment sa course, horizontalement et avec la même vitesse, tandis que, soumis à cette double action, il décrit une ligne courbe appelée *parabole* et finit par s'arrêter.

10. L'inertie de la matière sert à expliquer un certain nombre de faits.

Lorsqu'un cheval lancé avec une vitesse un peu grande s'arrête brusquement, son cavalier est souvent projeté en avant. C'est qu'en effet, participant au mouvement du cheval, il n'a pu modifier la vitesse qu'il partageait avec lui et qui a suffi pour l'emporter par-dessus la tête de l'animal. C'est de la même manière que s'expliquent les accidents dont sont victimes les personnes placées dans une voiture qui, lancée avec une grande vitesse, vient à heurter un obstacle qui l'arrête instantanément.

Lorsqu'on saute en bas d'une voiture en mouvement, on est presque toujours précipité par terre dans le sens de la marche. C'est qu'en effet, lorsqu'on arrive sur le sol, la vitesse des pieds se trouve brusquement annulée, tandis qu'au contraire les parties supérieures du corps, conservant toujours la vitesse qu'elles tenaient de la voiture, sont emportées par elle en avant. Lorsqu'on veut éviter ces accidents, il faut, en sautant, se pencher dans un sens inverse de celui de la marche, car la vitesse acquise n'a alors pour effet que de rétablir le corps dans la verticale.

Lorsqu'une locomotive, traînant à sa suite un certain nombre de wagons, vient à choquer un obstacle qui l'arrête, les voitures qui la suivent continuent leur marche en vertu de la vitesse acquise, montent les unes sur les autres, et c'est là ce qui rend si terribles les accidents de chemins de fer.

11. **Mouvement absolu et relatif.** — Le *mouvement absolu* d'un corps est le déplacement réel de ce corps dans l'espace, ce déplacement étant considéré par rapport à des points absolument fixes. Quand on considère, au contraire, le mouvement du mobile par rapport à des points qui sont eux-mêmes en mouvement, on dit que le mouvement est *relatif*. Ainsi, lorsqu'une personne se déplace sur le pont d'un bateau à vapeur, elle est en mouvement absolu par rapport à des repères fixes pris en dehors du bateau, mais elle est en mouvement relatif par rapport à tous les points du bateau qui sont eux-mêmes entraînés dans un mouvement commun.

12. **Mouvement uniforme.** — Lorsque le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux, le mouvement est dit *uniforme*, et l'espace parcouru pendant une seconde est appelé la *vitesse* du mouvement.

13. **Mouvement varié.** — Lorsqu'on fait agir une force sur un corps pendant un temps infiniment court, ce corps se met en mouvement sous l'action de cette force, et si on la suspend immédiatement, il continue, en vertu de son inertie, à se mouvoir d'un mouvement rectiligne et uniforme [1]; mais si l'on vient à faire agir sur lui une nouvelle force, son mouvement se modifie; la vitesse n'est plus la même et change à chaque instant sous l'action permanente et modificatrice de la force. On dit alors que le mouvement est *varié*.

La définition de la vitesse, en pareil cas, n'est plus aussi simple que dans le mouvement uniforme; et, sans entrer, à ce sujet, dans des détails qui sont du domaine de la mécanique, nous dirons que, dans un mouvement varié, la vitesse, à un moment donné, est celle du mouvement uniforme qui succéderait au mouvement varié, si à ce moment on suspendait l'action de la force qui agit sur le mobile.

14. **Mouvement uniformément varié.** — Le plus simple des mouvements variés est celui dans lequel les variations de la vitesse sont égales en temps égaux; il est appelé *mouvement uniformément varié*. La variation que subit la vitesse pendant une seconde est appelée *accélération*, que cette variation soit une augmentation ou une diminution. Dans le premier cas, le mouvement est uniformément accéléré, dans le second, il est uniformément retardé.

15. **Division de la physique.** — Les phénomènes physiques pouvant se grouper en cinq classes principales, nous diviserons la physique en cinq parties : 1° Pesanteur; 2° Chaleur; 3° Électricité et Magnétisme; 4° Acoustique; 5° Optique.

[1] Nous ne tenons compte ici ni de l'action de la pesanteur, ni de la résistance de l'air.

# LIVRE PREMIER

## PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

---

## CHAPITRE PREMIER

### PESANTEUR. — CENTRE DE GRAVITÉ. — PENDULE. MESURE DES POIDS. — BALANCES.

16. Un corps, qu'on tient à la main et qu'on abandonne ensuite, tombe jusqu'à ce qu'il ait rencontré un obstacle qui s'oppose à la continuation de son mouvement. La force qui a déterminé ce mouvement est appelée *pesanteur*. Elle est exercée par la terre elle-même sur tous les corps que nous connaissons, et l'on a l'habitude en physique de considérer cette force comme centralisée au centre de la terre. Ainsi nous supposerons toujours que ce centre résume en lui toutes les forces attractives exercées sur les corps par les différentes parties du globe, que c'est lui qui, par son attraction, détermine leur chute.

17. Il est important de nous rendre compte du mode d'action de la pesanteur. Agit-elle en un point unique des corps ou sur toutes les molécules à la fois? Telle est la première question à résoudre.

Les forces n'agissent ordinairement que sur un point des corps auxquels elles sont appliquées : si nous voulons traîner un fardeau sur le sol, nous appliquons en un de ses points la force qui est destinée à le faire mouvoir. Lorsque nous poussons une bille sur un tapis de billard, nous la frappons seulement en un point. La pesanteur, au contraire, exerce son action sur toutes les molécules du corps. En effet, prenons un morceau de

sucre et abandonnons-le à lui-même, il tombe vers le centre de la terre. Ramassons-le ensuite pour le mettre dans un mortier et le réduire en poudre très-fine par l'action du pilon, puis abandonnons ces grains de poudre à eux-mêmes, ils tomberont tous vers le centre de la terre, et cependant, si la pesanteur n'avait agi qu'en un seul point du morceau de sucre, le grain qui, après la pulvérisation, aurait représenté ou contenu ce point, se serait mis seul en mouvement, les autres restant en repos.

**18. Direction de la pesanteur. Verticale. Horizontale.** — Pour déterminer la direction de la pesanteur, on se sert d'un fil suspendu à un point fixe par une de ses extrémités, portant à l'autre un corps pesant, comme un morceau de plomb (fig. 2), et libre de prendre la direction que lui imprime la pesanteur. Ce fil est connu sous le nom de fil à plomb. Il est évident que, lorsqu'il est en équilibre, tendu par le corps pesant situé à son extrémité, l'effet de la pesanteur sur le corps est détruit, quoique son action subsiste, par la résistance du fil qui soutient le corps et l'empêche de tomber; mais, pour qu'il en soit ainsi, il faut nécessairement que la pesanteur agisse suivant le prolongement du fil.

Fig. 2.

La direction du fil à plomb en repos est désignée sous le nom de *verticale*. Elle est perpendiculaire à la direction des eaux tranquilles ou, en général, des liquides en repos. On sait par expérience que, lorsqu'on présente devant une glace un crayon, en lui donnant une direction perpendiculaire à la glace, l'image fournie par le miroir est dans le prolongement du crayon lui-même, tandis que, si l'on incline ce dernier, son image est inclinée aussi. Prenons pour miroir un bain de mercure (fig. 3); lorsqu'il sera bien en repos, suspendons au-dessus de lui un fil à plomb dont le corps pesant se termine en pointe, de manière que cette pointe effleure la surface du liquide, et nous constaterons que l'image du fil à plomb fournie par le bain de mercure est dans le prolongement du fil lui-même, ce qui nous prouve que la verticale est perpendiculaire à la surface des liquides en repos.

On donne le nom de plan *horizontal* à la surface plane formée par un liquide en repos, et d'*horizontale* à toute ligne située dans ce plan ou parallèle à ce plan.

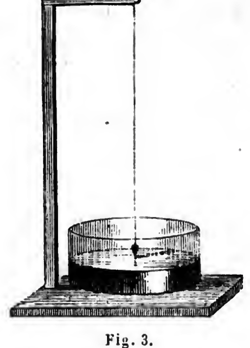


Fig. 3.

L'action de la pesanteur étant concentrée au centre de la terre, toutes les verticales vont se couper à ce point; et cependant, vu la distance très-considérable à laquelle a lieu cette intersection, on considère comme parallèles les verticales de lieux peu éloignés l'un de l'autre. C'est ainsi que dans une église les directions des fils ou chaînes qui suspendent les lustres à la voûte peuvent être considérées comme parallèles. Si la distance devient considérable, il n'en est plus de même : les verticales de Paris et de Dunkerque font entre elles un angle de 2° 11′ 56″.

19. **Niveau.** — Le niveau dont se servent si souvent les menuisiers, les maçons, etc., pour dresser des surfaces, est fondé sur l'emploi du fil à plomb qui, en un même lieu, prend toujours la même direction. Il se compose d'un triangle (fig. 4),

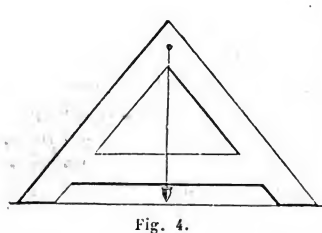


Fig. 4.

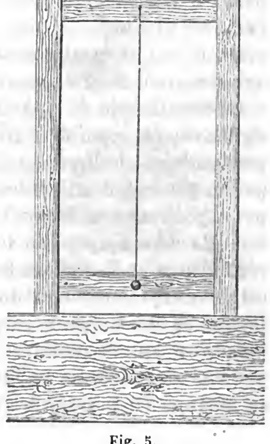


Fig. 5.

ou d'un quadrilatère (fig. 5) fait avec des traverses en bois et muni de prolongements dont les bases sont exactement dans le

même plan. Ce sont ces bases qui doivent reposer sur le corps dont on veut assurer l'horizontalité, les tablettes d'une bibliothèque, par exemple. Un fil à plomb suspendu au sommet du triangle tombe verticalement, et lorsque le niveau repose sur un plan parfaitement horizontal, le fil doit couvrir un trait tracé verticalement, sur la traverse horizontale. Pour établir l'horizontalité d'une tablette, on pose le niveau sur elle, successivement dans deux directions perpendiculaires, et dans ces deux positions on fait varier la tablette jusqu'à ce que le fil à plomb recouvre le trait.

20. **Lois de la chute des corps.** — *Tous les corps tombent également vite dans le vide.* — Nous avons vu (17) que la pesanteur agissait également sur toutes les molécules d'un même corps, et l'expérience va nous prouver qu'il en est de même sur les corps de différentes natures.

Fig. 6.

Prenons un grand tube en verre (fig. 6), fermé aux deux extrémités par deux viroles de cuivre dont l'une est garnie d'un robinet que l'on visse sur une machine, que nous étudierons plus tard sous le nom de machine pneumatique et qu'actuellement nous regarderons comme capable de faire le vide dans le tube, c'est-à-dire d'en extraire l'air qu'il contient. On a introduit dans le tube des corps différents, tels que du plomb, de l'or en feuilles, des barbes de plumes, des morceaux de liége. Si nous faisons le vide et que nous renversions rapidement le tube, nous constaterons que tous les corps tombent également vite, qu'ils mettent exactement le même temps à parcourir la longueur de l'appareil. Mais si nous laissons rentrer de l'air en ouvrant le robinet, les différents corps tombent avec des vitesses inégales, et la différence entre leur vitesse est d'autant plus grande qu'on a laissé rentrer une quantité d'air plus considérable. Les corps les plus lourds sont ceux qui tombent le plus vite. Cette expérience nous prouve donc 1° *Que dans le vide tous les corps tombent également vite ;* 2° *Que dans l'air les vitesses de chute sont inégales.* Nous expliquerons ce dernier fait en admettant qu'il est dû à la résistance de l'air.

*image*
*not*
*available*

Une minute contenant 60 secondes, il faut, pour répondre à la question, multiplier 60 par lui-même, en d'autres termes, l'élever au carré, ce qui donne 3600, puis multiplier $4^m,9$ par 3600, ce qui donne 17640.

Dans le vide, un corps parcourt donc $17^k,640^m$ dans la première minute de sa chute.

**25. Intensité de la pesanteur.** — Le nombre $4^m,9$ que nous venons d'admettre comme représentant l'espace parcouru dans le vide, pendant la première seconde de sa chute, par un corps qui tombe librement, n'est pas le même en tous les points de la terre, il est exact pour les corps tombant à Paris, mais il augmente quand on s'approche des pôles de la terre, et diminue quand on s'approche de l'équateur. Cela s'explique de la manière suivante.

Comme la terre n'est pas une sphère, qu'elle est renflée à l'équateur et aplatie aux pôles, à mesure que nous nous approchons de l'équateur, nous sommes plus éloignés du centre de la terre; par suite, la force attractive, que nous considérons comme condensée au centre (16), s'exerçant à une distance plus considérable, devra être moindre et les corps devront tomber avec une moins grande rapidité. Au contraire, à mesure que l'on s'approche du pôle, la distance au centre de la terre devenant plus petite, l'attraction a plus d'effet et la vitesse de chute augmente.

On peut, du reste, démontrer facilement la variation d'intensité de la pesanteur en différents lieux. On se sert pour cela d'un appareil appelé *peson*. Il se compose (fig. 8) d'une lame d'acier flexible recourbée en son milieu. De chacune de ses extrémités part un arc métallique qui va traverser une ouverture pratiquée près de l'autre extrémité. L'un des arcs se termine par un crochet, l'autre par un anneau.

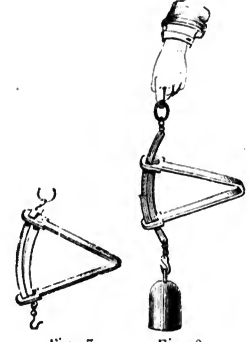


Fig. 7. Fig. 8.

Lorsque l'appareil n'est soumis à aucune force, la lame flexible est dans la position que nous présente la figure 7, mais lorsque, tenant l'anneau à la main, on suspend des poids au crochet, cette lame

s'infléchit, comme le représente la figure 8. Les deux arcs glissent l'un sur l'autre et leur course est d'autant plus étendue que le poids est plus considérable. En se transportant avec cet appareil en différents lieux de la terre, en y accrochant à chaque station le même corps, on constate que l'effet n'est pas le même sur le peson; que plus on approche de l'équateur, moins la lame d'acier s'infléchit, que l'effet est inverse à mesure qu'on s'approche du pôle. Donc l'intensité de la pesanteur croît lorsqu'on s'approche du pôle, et décroît lorsqu'on s'en éloigne.

26. **Centre de gravité.** — Nous avons vu (17) que la pesanteur agissait également sur toutes les molécules d'un corps.

Un corps pesant peut donc être considéré comme soumis à une série de forces dirigées suivant des verticales et par suite parallèles.

On conçoit très-bien que toutes ces forces appliquées en des points différents pourraient être remplacées par une force unique appelée le *poids* du corps, qui serait appliquée à un point spécial que l'on désigne sous le nom de *centre de gravité* du corps. Cette hypothèse étant faite (et des raisonnements qui ne peuvent trouver place ici pourraient en démontrer l'exactitude), nous considérerons le *plus souvent la masse des corps comme concentrée* à leur centre de gravité, et, au lieu de raisonner sur les molécules pesantes des corps, nous en ferons abstraction pour ne raisonner que sur la molécule pesante les résumant toutes et située au centre de gravité.

Lorsque le centre de gravité d'un corps lui est invariablement lié, il suffit de soutenir ce centre pour que le corps entier soit en équilibre. (Nous avons dit invariablement lié, parce qu'il est des cas où le centre de gravité n'est pas situé dans le corps lui-même. Ainsi, le centre de gravité d'un anneau circulaire est au centre de la circonférence de cet anneau, et si le centre n'est pas invariablement lié à l'anneau, comme il l'est dans une roue par les rayons, on aura beau soutenir ce centre, l'anneau ne sera pas soutenu pour cela.)

27. Lorsqu'un corps est soutenu par un point situé sur la verticale passant par son centre de gravité, l'équilibre peut être *indifférent*, *stable* ou *instable*. Expliquons la signification de ces différents termes.

Considérons une sphère solide : son centre de gravité est à son centre géométrique. Supposons que nous fassions passer un

axe fixe suivant un diamètre, le centre de gravité sera situé sur lui; le poids du corps sera détruit par la résistance de l'axe, quelle que soit la position de la sphère. Si nous la faisons tourner autour de cet axe, elle restera en équilibre dans toutes les positions que nous lui donnerons ; c'est *le cas d'un équilibre indifférent.* On peut réaliser cette expérience en prenant une pomme bien ronde, en faisant passer par son centre une aiguille à tricoter et fixant l'aiguille. Il est évident que, l'aiguille étant fixe, on pourra faire tourner la pomme sur elle, et que dans chaque position elle sera en équilibre.

Il en serait autrement si l'axe ne passait pas par le centre. Ainsi, supposons un corps solide M (fig. 9), dont le centre de gravité G n'est pas situé sur l'axe AA' qui le soutient. Ce solide

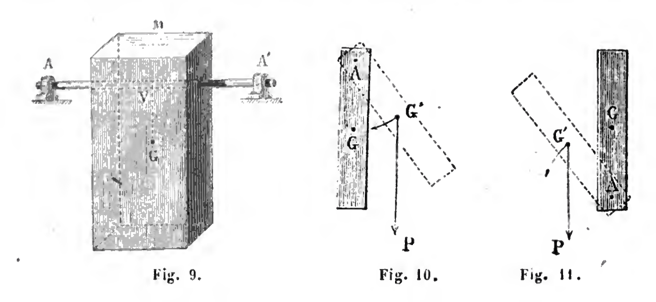



Fig. 9. Fig. 10. Fig. 11.

ne restera en repos que si la verticale GV du centre de gravité rencontre AA', auquel cas la résistance de l'axe détruira l'effet du poids du solide.

Mais cette condition peut être réalisée de deux manières : dans le premier cas, le centre de gravité G (fig. 10) sera situé au-dessous de l'axe A ; alors l'équilibre sera *stable*, c'est-à-dire que, si l'on éloigne le corps de sa position d'équilibre, il tendra à y revenir. Dans la figure, le corps étant amené à la position représentée par les lignes ponctuées, le poids P agit au centre de gravité qui est transporté en G', et tend à ramener le corps à sa position primitive, comme l'indique la petite flèche courbe.

Dans le second cas, le centre de gravité G (fig. 11) est au-dessus de l'axe A, alors l'équilibre est *instable*, c'est-à-dire que si l'on éloigne tant soit peu le corps de sa position d'équilibre, il s'en

écarte lui-même davantage sans pouvoir y revenir. Dans la figure 11, on voit que le corps est entraîné dans le sens indiqué par la flèche courbe.

28. **Équilibre d'un corps pesant reposant sur un plan horizontal.** — Quand un corps pesant repose sur un plan horizontal, les points de contact forment un polygone que l'on appelle le polygone de sustentation du corps. Lorsqu'une boîte carrée est placée sur une table, son polygone de sustentation est le carré qui forme le fond de cette boîte : une chaise reposant sur ses quatre pieds a pour polygone de sustentation un quadrilatère. Un cylindre circulaire oblique s'appuyant sur une table a pour polygone de sustentation son cercle de base. Soit G son centre de gravité (fig. 12). Le poids de ce cylindre peut être considéré comme une force verticale agissant au point G. Si la verticale du point G tombe dans l'intérieur de la base, il y aura équilibre,

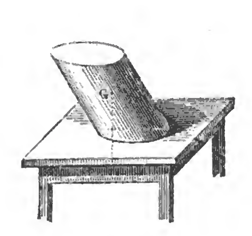



Fig. 12.

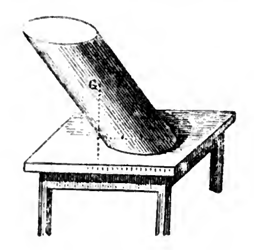



Fig. 13.

car l'effet du poids sera détruit par la résistance de cette base. Si, au contraire (fig. 13), la verticale du point G tombe en dehors, le poids aura tout son effet, entraînera le point G, et par suite le corps tout entier qui tombera couché sur la table.

La stabilité est d'autant plus grande que le polygone de sustentation offre plus de surface et que, dans les petits déplacements que le corps peut subir, la verticale du centre de gravité a moins de chances de tomber en dehors de ce polygone. C'est ainsi que, lorsqu'on charge une voiture, on doit, autant que possible, ne pas porter la charge trop haut, car, à mesure qu'elle s'élève, le centre de gravité du système s'élève aussi. Pour que la voiture ne verse pas, il faut que la verticale passant par son centre de gra-

vité G (fig. 14) rencontre toujours le sol entre les points par lesquels les roues le touchent. Or, plus G sera élevé, moins la voiture pourra s'incliner, sans que la verticale qui passe par ce point sorte des limites assignées. Dans la figure, le centre de gravité G ne peut dépasser le point B sans que la voiture verse.

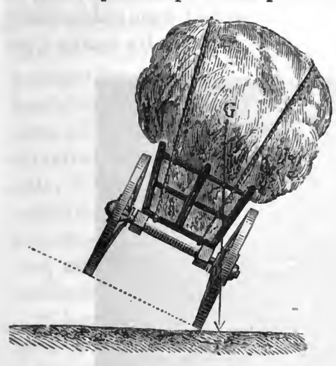



Fig. 14.

Tout le monde connaît ces jouets qui sont formés d'un cylindre de moelle de sureau, sur l'une des bases duquel on a collé la moitié d'une balle de plomb (fig. 15). Si on les couche sur une table, ils se redressent immédiatement pour se placer verticalement; car, le centre de gravité du système étant dans la balle de plomb, qui à elle seule est plus lourde que tout le cylindre en sureau, la verticale de ce centre, lorsque le corps est couché sur le côté, tombe en dehors des points d'appui; le poids peut alors produire tout son effet, entraîner le centre de gravité, et par suite redresser le cylindre.

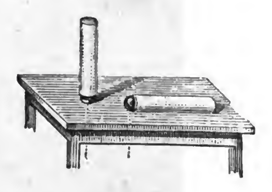


Fig. 15.

Si l'on place le cylindre verticalement, la balle de plomb en haut, l'équilibre sera instable; au moindre dérangement la petite masse métallique entraînera le tout, le cylindre se couchera sur le côté, et se redressera immédiatement sur la balle de plomb.

29. **Du Pendule.** — Lorsqu'un corps pesant, une boule A (fig. 16), est suspendue à l'extrémité d'un fil BA fixé en B, le système est en équilibre lorsque le fil est vertical, car alors l'effet de la pesanteur est détruit par la résistance du fil. Si l'on vient à écarter celui-ci de sa position d'équilibre, pour l'amener en BA', et qu'on l'abandonne à lui-même, la boule A se met en mouvement et décrit un arc de cercle dont le centre est le point B.

Arrivée en A, la boule, en vertu de la vitesse acquise de A′ en A, dépasse la position d'équilibre pour remonter, suivant A′A″, jusqu'à ce que la vitesse soit annulée, ce qui arrive lorsque le corps a atteint la position A″ symétrique de A′. Mais en A″ le corps pesant se trouve dans des conditions identiques à celles où il se trouvait lorsqu'on l'a abandonné en A′; il doit donc redescendre pour remonter ensuite en A′, et ainsi de suite. Du moins c'est

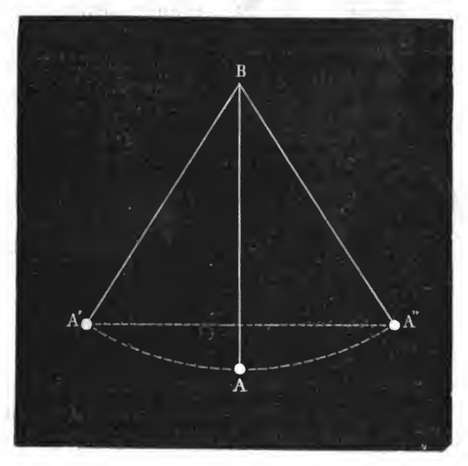



Fig. 16.

ainsi que les choses se passeraient dans le vide. Dans l'air, la résistance de ce milieu agit pour diminuer de plus en plus l'espace parcouru par le mobile, et, au bout d'un certain temps, il revient au repos. Lorsque le corps pesant est arrivé en A″, il a accompli ce qu'on appelle une oscillation, et l'angle ABA″ est désigné sous le nom d'*amplitude* de l'oscillation.

On donne le nom de *pendule* à tout corps pesant exécutant autour d'un point de suspension le mouvement d'oscillation que nous venons de décrire. Ce mouvement est soumis à des lois que nous allons vérifier par l'expérience :

1° Loi de l'isochronisme. — *Pour de petites amplitudes ne dépassant pas 4° à 5°, et dans le même lieu, la durée des oscilla-*

*tions d'un pendule est constante, malgré les variations de l'amplitude, ou, en d'autres termes, les oscillations sont isochrones.*

Pour vérifier cette loi trouvée par Galilée[1], prenons un fil très-délié de 1 mètre, à l'extrémité duquel nous suspendrons une bille d'ivoire. Fixons ce fil par l'extrémité opposée à la bille, écartons-le de sa position d'équilibre d'un angle de 5° et abandonnons-le; il va décrire ses oscillations, et son mouvement pourra durer une heure environ. Comptons le nombre d'oscillations exécutées pendant les cinq premières minutes du mouvement; puis, au bout d'un quart d'heure, comptons encore le nombre d'oscillations effectuées pendant cinq autres minutes; répétons cette observation un certain nombre de fois pendant que le pendule oscille. D'après ce que nous avons dit plus haut, l'amplitude des oscillations du pendule devient de plus en plus petite; mais, malgré cette variation, le nombre d'oscillations exécutées pendant cinq minutes reste constant, ce qui prouve que la durée d'une oscillation reste aussi constante.

2° Loi des longueurs. — *La durée des oscillations d'un pendule varie avec la longueur du pendule et augmente avec elle.*

Si nous écartons de la verticale deux pendules, le premier ayant une longueur quadruple de celle du second, et que nous les abandonnions en même temps, le plus court oscillera plus vite que l'autre, et le temps employé par lui pour effectuer une oscillation sera deux fois plus petit; si les longueurs étaient entre elles comme les nombres 9 et 1, les temps de l'oscillation seraient entre eux comme 3 et 1; si elles étaient comme 16 et 1, les temps seraient comme 4 et 1; or les nombres 1, 2, 3, 4, sont appelés en arithmétique les racines carrées des nombres 1, 4, 9, 16. Nous formulerons donc la loi des longueurs comme il suit : *les durées des oscillations de pendules de longueurs différentes sont entre elles comme les racines carrées des nombres qui expriment ces longueurs.*

Remarque. — Nous ferons enfin remarquer que le mouvement pendulaire étant dû à l'action de la pesanteur, il doit dépendre de l'intensité de cette force et varier avec elle; c'est ce que l'expérience a constaté; et l'on a même employé le pendule à la mesure de l'intensité de la pesanteur en différents lieux. Cette

[1] Galilée, né à Pise en 1564, mort en 1642.

BIBLIOTECA VITTORIO

méthode confirme de tous points les résultats que nous avons exposés plus haut (25).

30. **Application du pendule aux horloges.** — Les horloges sont des appareils destinés à mesurer le temps par la marche, sur un cadran, d'aiguilles animées d'un mouvement uniforme, c'est-à-dire parcourant des espaces égaux en temps égaux. Le moteur dans une horloge est tantôt un poids suspendu à une chaîne enroulée sur un axe qu'elle met en mouvement, en se déroulant sous l'action du poids qu'elle soutient, tantôt un ressort qui, en se détendant, communique le mouvement aux pièces de l'appareil. Quel que soit le moteur employé, son action a besoin d'être régularisée pour que son mouvement soit uniforme. Ainsi, dans le cas d'une horloge à poids, le mouvement du poids tombant sous l'action de la pesanteur serait uniformément accéléré; par suite, il en serait de même de celui des aiguilles.

Huyghens [1] a eu l'heureuse idée, en 1657, d'employer le pendule comme régulateur des horloges. Voici le principe sur lequel est basé cet emploi. Puisque le pendule nous présente par l'isochronisme de ses oscillations une série de phénomènes identiques, se reproduisant en temps égaux, il peut servir, lorsqu'on fera dépendre de son mouvement le mouvement d'une horloge, à régulariser celle-ci.

Pour relier le pendule à l'horloge, on se sert de l'échappement à ancre. Une pièce ABC (fig. 17), en forme d'ancre, est suspendue à un axe horizontal D, et peut tourner autour de lui. L'axe D (fig. 18) porte une tige F qui se termine inférieurement par une fourchette G, dans les branches de laquelle passe la tige du pendule. Par cette disposition, le pendule ne peut osciller sans faire osciller l'ancre en même temps. Dans ses oscillations, l'ancre vient alternativement engager ses extrémités A et C entre les dents d'une roue dentée E, qui est fixée au dernier arbre du mécanisme de l'horloge. Pendant qu'une des parties A ou C est engagée, la roue reste immobile, et par suite le mouvement de l'horloge se trouve décomposé en une série de mouvements séparés par des intervalles de repos se reproduisant d'une manière parfaitement régulière, vu l'isochronisme des oscillations du pendule.

[1] Huyghens, savant hollandais, né à la Haye en 1629, mort en 1695.

Mais le pendule ne tarderait pas à s'arrêter, en vertu de la résistance de l'air et des frottements. Pour éviter cet inconvénient, on s'est arrangé de manière que l'horloge, en même temps qu'elle est réglée par le pendule, entretienne la vitesse de ce der-

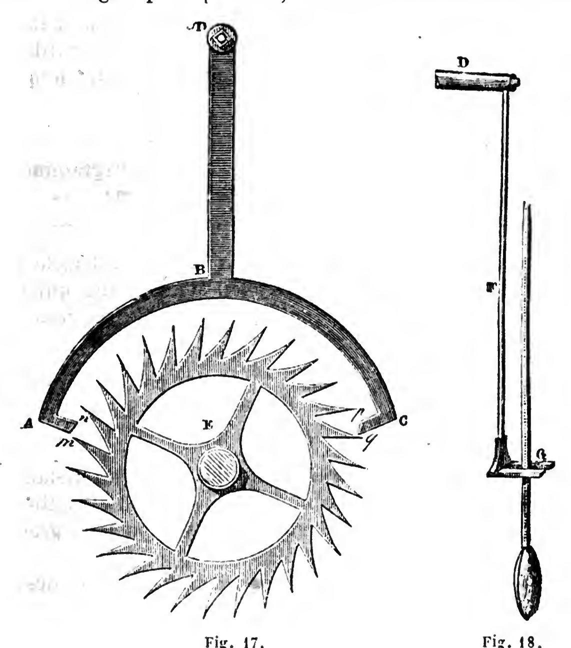



Fig. 17. Fig. 18.

nier. Pour cela, les deux extrémités A et C de l'ancre présentent du côté de la roue deux parties *mn*, *pq*, inclinées en sens contraires, sur lesquelles les dents de la roue doivent glisser avant de s'échapper. Pendant ce glissement, la dent exerce sur l'ancre une pression, qui lui restitue à chaque moment la vitesse que les frottements et la résistance de l'air lui font perdre.

31. **Mesure des poids. Balances.** — Nous avons dit (26) que le *poids* d'un corps était la force unique qui, appliquée à son centre de gravité, pouvait être considérée comme remplaçant les forces égales et parallèles exercées par la pesanteur sur toutes

ses molécules. Nous allons maintenant indiquer les moyens employés pour mesurer les poids, pour les comparer entre eux. Mais, avant tout, nous devons fixer l'unité choisie pour cette mesure. Elle varie suivant les pays. En France, c'est le *gramme*, qui est le *poids d'un centimètre cube d'eau distillée*, prise à la température de 4° au-dessus de zéro. Nous verrons plus tard pourquoi il est nécessaire de définir les conditions dans lesquelles doit se trouver cette eau.

Les multiples du gramme sont :

| | | |
|---|---|---|
| Le décagramme, qui vaut. . . | 10 | grammes. |
| L'hectogramme. . . . . . | 100 | — |
| Le kilogramme. . . . . . | 1000 | — |

Pour les poids très-considérables, on fait usage, dans le chargement des wagons, des navires, etc., d'une unité qui est la tonne ou tonneau métrique équivalant à 1 000 kilogrammes.

Les sous-multiples du gramme sont :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Le décigramme, qui vaut la | | 10e | partie du gramme. |
| Le centigramme, | — | 100e | — |
| Le milligramme, | — | 1000e | — |

On fait usage dans la mesure des poids de masses métalliques en cuivre, fonte, platine ou aluminium, qui ont été taillées de manière à représenter exactement par leur poids le gramme, ses multiples ou ses sous-multiples.

Les appareils à l'aide desquels on effectue la mesure des poids sont appelés *balances*.

32. **Balance ordinaire.** — L'emploi de la balance ordinaire est fondé sur le principe suivant :

Soit une barre inflexible AB appelée *fléau* (fig. 19), que nous

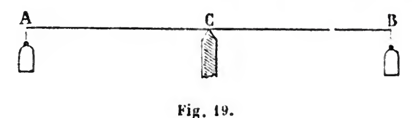



Fig. 19.

supposerons réduite à une ligne droite. Au point C, qui la divise exactement en deux parties égales appelées *bras du fléau*, faisons-la reposer sur une pièce à arête vive appelée *couteau*. Mettons-la

dans une position horizontale. Si aux extrémités A et B nous plaçons des poids absolument égaux, l'horizontalité ne sera pas détruite, car, la tige étant également sollicitée par ces deux poids, il n'y a pas de raison pour qu'elle s'incline dans un sens plutôt que dans l'autre. Mais si l'un de ces poids était plus grand que l'autre, il ferait incliner la ligne AB de son côté. Donc si nous parvenons à établir l'horizontalité en mettant en A un morceau de bois, en B un poids marqué de 2 grammes, nous pourrons en conclure que ces deux corps ont le même poids, c'est-à-dire que le morceau de bois pèse 2 grammes.

Mais pour que cette conclusion soit exacte, il faut être absolument dans les conditions où nous nous sommes placés, c'est-à-dire que les deux bras AC,CB, soient parfaitement égaux en longueur; car si CB était double de AC (fig. 20), l'horizontalité ne pourrait

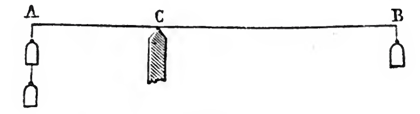



Fig. 20.

exister avec des poids égaux suspendus en A et B, et l'expérience montre que, pour l'obtenir, il faudrait en A suspendre deux poids identiques à celui qui serait suspendu en B. Si CB était triple de AB (fig. 21), il faudrait en A suspendre trois poids égaux à celui qui serait en B, et ainsi de suite.

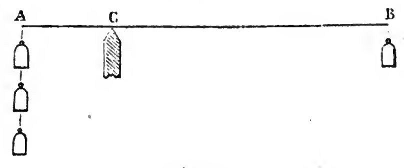



Fig. 21.

Nous remarquerons que les conditions, dans lesquelles nous nous sommes placés, sont tout à fait idéales. Nous ne les avons admises au début que pour ne pas entrer dans des raisonnements appartenant au domaine de la mécanique. Il nous faut cependant arriver à la réalité.

33. La barre inflexible sur laquelle nous avons raisonné ne peut être réduite à une ligne mathématique, comme nous l'avons supposé. Il faut, dans la pratique, qu'elle ait dans tous les sens des dimensions finies capables d'assurer sa solidité. Par suite elle aura un certain poids qui agira à son centre de gravité et dont il importe d'examiner l'effet sur le jeu de l'appareil.

Et d'abord le fléau doit être construit de manière que ses deux bras égaux en *longueur* soient aussi égaux en *poids*. Car si l'un des bras pesait plus que l'autre, il est évident que, lorsque l'horizontalité serait établie, les poids suspendus à l'extrémité du bras le plus lourd seraient moindres que ceux qui seraient suspendus à l'extrémité de l'autre. Cette condition étant réalisée, le centre de gravité du fléau est évidemment sur la verticale qui divise le fléau en deux parties égales et qui, par suite, passe par le point de suspension. Examinons quelle doit être sa position sur cette verticale. Il peut se trouver *au-dessus* ou *au-dessous* du point de suspension, ou *coïncider* avec ce point.

Discutons ces trois hypothèses :

1° Si le centre de gravité était au point de suspension lui-même, le poids du fléau n'aurait pas d'effet sur le jeu de l'appareil, car cet effet serait toujours détruit par la résistance du point de suspension : la balance serait *indifférente*, c'est-à-dire que des poids égaux la tiendraient en équilibre dans toutes les positions, inclinées ou non, et l'horizontalité du fléau ne serait plus le signe exclusif de l'égalité des poids suspendus aux extrémités.

2° Soit G (fig. 22) le centre de gravité du fléau situé au-dessus du point de suspension C. Dès que les poids mis à l'extrémité B surpasseront, même d'une quantité très-faible, les poids suspendus en A, le fléau s'inclinera et prendra la position A'B'; mais alors le centre de gravité viendra de G en G', du côté de B, et le poids du fléau, dont l'effet était détruit par la résistance du point de suspension, lorsqu'il y avait horizontalité, agissant librement en G', ajoutera son effet à celui des poids suspendus en B et fera basculer complétement l'appareil. Dans ce cas, la balance est dite *folle*.

3° Enfin supposons le centre de gravité G (fig. 23) *au-dessous* du point de suspension. Dès qu'on mettra un excès de poids du côté B, le fléau s'inclinera encore, mais alors le centre de gra-

vité se relèvera de G en G′, du côté de A, et le poids du fléau agissant librement en G′ tendra à ramener le fléau à l'horizontalité et l'empêchera de basculer.

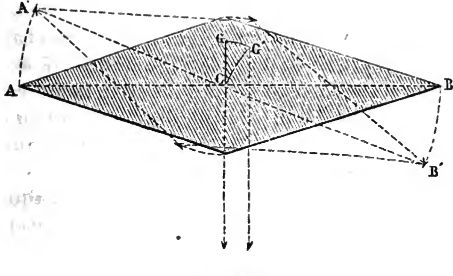



Fig. 22.

Il est certain que ce dernier cas est le seul possible dans la pratique.

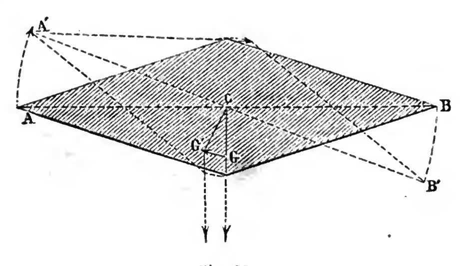



Fig. 23.

**34. Sensibilité de la balance.** — Il est évident d'ailleurs que cette action du poids du fléau,que nous voulons ici utiliser, ne doit pas être exagérée, car il faudrait alors un trop grand excès de poids sur l'une des extrémités pour faire incliner la balance; on n'apprécierait alors que des différences par trop grandes et la balance ne serait pas *sensible*. Pour éviter cet inconvénient, on diminue le poids de la barre, autant qu'on peut le faire sans en altérer la solidité, et on la construit de telle sorte que le centre de gravité soit *aussi près que possible* du point de

suspension C, sans cependant coïncider avec lui. Cette dernière précaution repose sur un principe que nous avons établi expérimentalement au paragraphe 32, et qui consiste en ce qu'une force agissant sur une masse solide a d'autant moins d'effet qu'elle agit à une plus petite distance du point fixe à la force. Or, la ligne G'C peut être considérée comme une barre solide dont le point fixe est en C ; plus le centre de gravité sera près de ce point C de suspension du fléau, plus cette ligne sera courte, moins grand sera l'effet du poids du fléau agissant au centre de gravité, et, dans ces conditions, de faibles poids auront plus d'efficacité et la balance sera plus sensible.

35. Après avoir indiqué les conditions dans lesquelles doit être construite une balance pour qu'elle soit exacte et sensible, nous allons maintenant décrire ses différentes parties.

La balance ordinaire se compose essentiellement d'une barre rigide ou fléau FF′ (fig. 24), qui est traversée perpendiculaire-

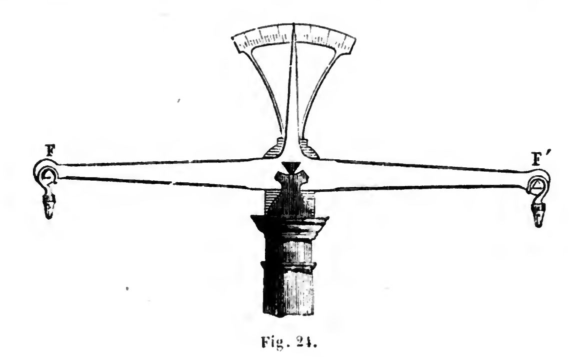



Fig. 24.

ment en son milieu par un prisme d'acier appelé couteau. L'arête inférieure de ce couteau repose sur deux petits plans d'agate ou d'acier trempé, dont l'un est en avant du fléau, l'autre en arrière ; mais tous deux à la même hauteur. Ces plans sont portés par la colonne qui soutient tout l'appareil ; l'arête du couteau sert d'axe de suspension, et c'est autour d'elle que le fléau peut osciller. Aux extrémités F et F′ se trouvent suspendus des plateaux destinés à porter les poids. Ces plateaux doivent être doués d'une

image
not
available

permet, lorsque la balance n'est pas en activité, de soutenir le fléau par d'autres points. Pour cela, à l'aide d'une manivelle dont le bouton est en O, on soulève une fourchette DE qui, soulevant elle-même le fléau, empêche le couteau de se fatiguer sur le plan d'acier. L'aiguille indicatrice S, au lieu d'être au-dessus du fléau, est au-dessous; on peut ainsi lui donner une plus grande longueur, ce qui rend ses écarts plus sensibles.

Les figures 26 et 27 représentent des balances moins coûteuses, et qui, par leur sensibilité, rendent chaque jour les plus grands services dans les laboratoires.

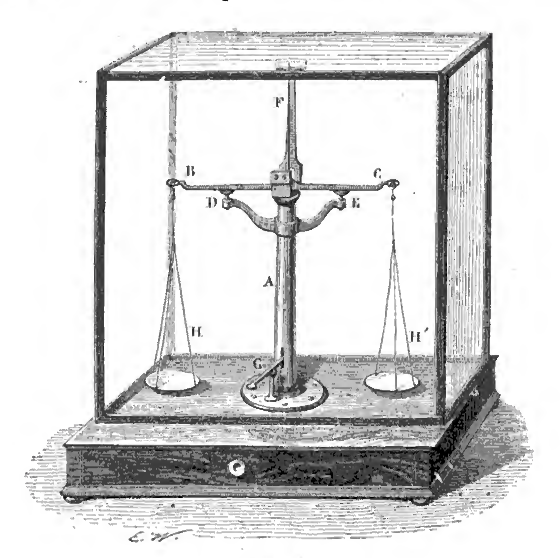



Fig. 26.

37. **Pesées.** — Pour faire une pesée, on met le corps dans l'un des plateaux, dans l'autre on place des poids gradués jusqu'à ce que l'horizontalité du fléau soit établie; le nombre des poids gradués employés représente le poids du corps. Mais cette méthode suppose que la balance est *parfaitement* exacte, ce qui arrive rarement.

Pour se mettre à l'abri des défauts de construction, on emploie la méthode de la *double pesée*. L'objet dont on veut déterminer le poids est placé dans l'un des plateaux ; dans l'autre on met de

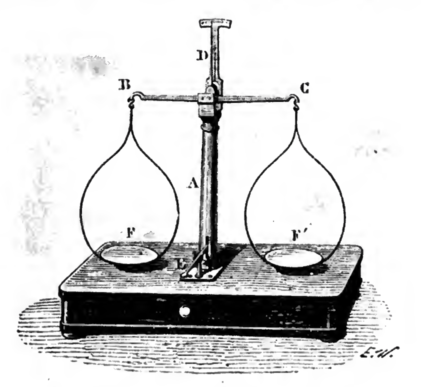



Fig. 27.

la grenaille de plomb ou du sable jusqu'à ce que l'horizontalité du fléau soit établie. Puis on retire le corps à peser ; *à sa place, dans le même plateau*, on met des poids marqués, jusqu'à ce que le fléau revienne dans la position horizontale. Il est évident que ces poids représentent rigoureusement le poids du corps, puisque, agissant comme lui à l'extrémité du même bras de levier, ils ont fait eux aussi équilibre, dans des conditions identiques, à la grenaille de plomb qui se trouve dans l'autre plateau.

Avec cette méthode, pourvu qu'on opère avec une balance sensible, on fera toujours une pesée exacte.

38. **Balance Roberval**. — On doit à Roberval une balance dont l'emploi s'est considérablement étendu dans le commerce. L'avantage qu'elle présente sur la balance ordinaire consiste en ce que ses plateaux ne sont pas suspendus par des chaînes souvent gênantes dans la pratique, et, par suite, reçoivent plus facilement les corps à peser, flacons, poudres, etc.

Elle est représentée par la figure 28.

Le fléau AB (fig. 29) peut osciller autour du point C. A ses extrémités A et B sont suspendues des tiges AD et BE supportant

les plateaux P et P′ et s'articulant en D et E avec une barre DE logée dans le pied de l'instrument et mobile sur un axe placé en

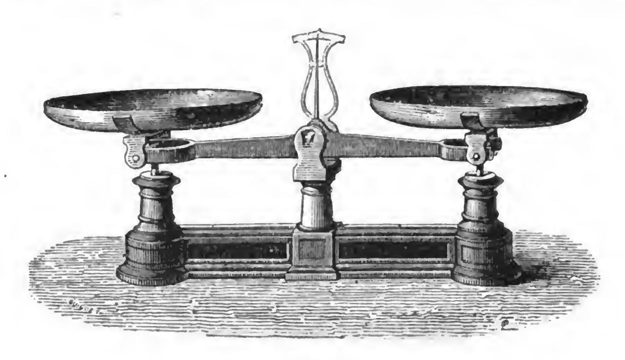


Fig. 28.

son milieu. Lorsque le fléau AB s'incline, DE s'incline aussi; mais, grâce aux articulations D et E, le parallélogramme ABDE

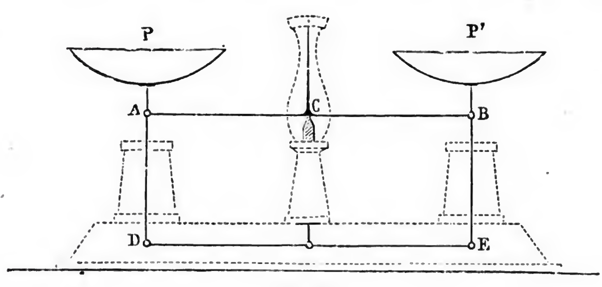



Fig. 29.

se déforme, tandis que les tiges AD et BE, restant verticales, maintiennent les plateaux horizontaux.

* 39. **Balance de Quintenz ou Bascule.** — La balance de Quintenz ou bascule est aussi très-employée dans les maisons de commerce, bureaux de messageries et gares de chemins de fer. Elle sert à peser les fardeaux lourds en n'employant que des poids

dix fois plus petits, ce qui est un avantage évident pour la rapidité de l'opération. Elle est représentée par la figure 30; la figure 31 en fera saisir plus facilement le mécanisme.

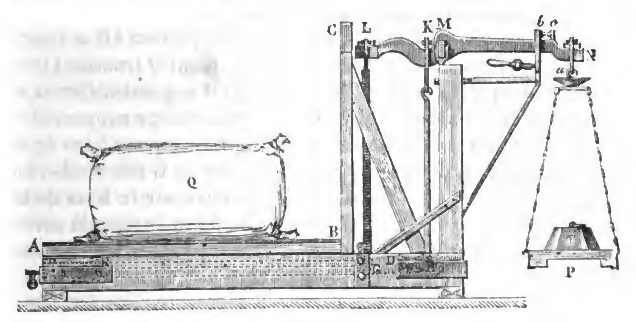



Fig. 30.

Le plateau AB est destiné à recevoir les corps que l'on veut peser. Il se relève suivant BC; contre BC vient se fixer une pièce inclinée CD. Le plateau n'a que deux points de support : l'un en E sur une barre capable d'osciller autour du point F et s'appuyant sur l'extrémité inférieure de la tringle GL; l'autre en D par l'interméd

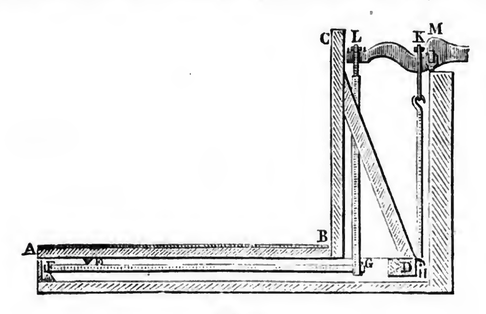



Fig. 31.

diaire de la pièce inclinée qui vient s'appuyer sur une tringle HK. Les deux tringles HK et GL sont accrochées aux points L et K à une barre LN mobile autour du point M. De plus LM est égale à

cinq fois la longueur de KM, et FG est cinq fois plus long que FE. D'autre part, la barre LN porte à son extrémité un plateau P destiné à recevoir des poids marqués, et le point M est placé de telle sorte que MN soit égale à dix fois KM.

Ceci posé, il est évident que la charge Q du plateau AB se trouve répartie entre le point E et le point D. Le point D transmet intégralement en K la portion de charge qu'il supporte. Quant au point G, il ne reçoit que le cinquième de la charge supportée en E; car FE étant le cinquième de FG, il suffirait, pour faire équilibre aux poids appliqués en E, d'appliquer en G des poids cinq fois plus faibles. Donc la charge totale arrive sur le bras de levier LM divisée en deux parties : en K, la première partie arrive intégralement; en L, la seconde partie arrive réduite au cinquième; mais comme cette seconde partie agit à une distance LM du point de suspension cinq fois plus considérable que KM, elle a cinq fois plus d'effet que si elle agissait en K, et par suite tout se passe comme si la charge totale agissait au point K. Nous ferons encore remarquer que le bras de fléau NM étant dix fois plus long que le bras KM, il faudra employer dans la manœuvre de cette balance des poids dix fois plus petits que ceux qui représentent le poids du fardeau à peser. Il faudra donc, après la pesée, multiplier par 10 le nombre de poids marqués mis dans le plateau P.

On reconnaît l'horizontalité du fléau à l'aide de deux appendices saillants *b* et *c*, dont l'un *b* est fixe, et dont l'autre *c*, mobile avec le fléau, doit venir se placer en regard du premier.

Avant de faire une pesée, on doit toujours s'assurer si la balance est horizontale quand il n'y a rien dans le plateau AB. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, on établit au préalable l'horizontalité en mettant des poids dans une coupe *a* située au-dessus du plateau P.

---

# CHAPITRE II

## NOTIONS SUR LES DIVERS ÉTATS DES CORPS.

40. Nous avons vu que la matière qui forme tous les corps peut affecter des états différents que l'on désigne sous le nom d'états *solide*, *liquide* et *gazeux*. Il est important d'établir les caractères de ces trois classes de corps.

41. **Solides.** — Dans les solides, les molécules sont unies de telle sorte qu'on ne peut les séparer sans effort. La force qui les maintient unies entre elles, qui s'oppose à leur séparation, s'appelle *cohésion*.

La cohésion des corps est un effet des attractions qui s'exercent entre leurs molécules. Dans les solides, cette force est souvent considérable. On peut s'en rendre compte par la grandeur de l'effort qu'il faut faire pour séparer leurs parties. Ainsi, par exemple, lorsqu'on suspend par l'une de ses extrémités un fil d'acier, d'un millimètre carré de section, et qu'on attache des poids à l'autre extrémité, on constate que, pour qu'il se rompe, il faut que les poids suspendus atteignent une valeur de 92 kilogrammes. On peut conclure de là qu'au moment de la rupture, 92 kilogrammes mesurent la résultante des actions attractives qui s'exercent entre deux tranches prismatiques d'acier ayant un millimètre carré de base et une hauteur égale à la distance à laquelle deviennent insensibles les actions dont il s'agit.

Cette distance est excessivement petite. Il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que constamment on place l'une contre l'autre deux surfaces solides de grandeur quelconque sans observer entre elles aucun effet d'attraction sensible. Ainsi, par exemple, plaçons un tube de cristal sur une table de marbre, et nous n'observerons aucune attraction entre ces deux corps. Cependant ils sont tous les deux assez polis pour que le contact soit intime. Quoi qu'il en soit, ce degré de poli n'est pas suffisant encore, et les petites rugosités que présentent les deux corps maintiennent

encore une partie des molécules de leurs surfaces à des distances suffisantes pour que l'attraction ne s'exerce pas d'une manière sensible.

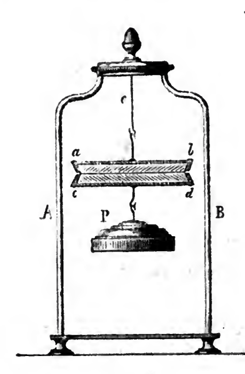


Fig. 32.

Toutefois, en se plaçant dans des conditions particulières et en prenant les précautions suffisantes, on peut faire naître une adhérence très-notable entre deux corps séparés. Prenons, par exemple, deux lames de glaces assez épaisses et bien polies, *ab* et *cd* (fig. 32) ; faisons-les glisser l'une sur l'autre en appuyant sur elles, et nous constaterons que, par cette seule pression, les deux lames adhèrent; la force qui les maintient unies est assez grande pour que l'on puisse suspendre le système à un crochet *e*, soutenu lui-même par les colonnes A et B. L'adhérence qui s'est établie est suffisante pour triompher non-seulement du poids de la lame *cd*, qui ne se sépare pas de *ab*, mais aussi pour supporter un poids P, que l'on attache au-dessous de *cd*.

Les glaces une fois unies ne se séparent pas, même lorsqu'on les transporte sous un récipient dont on extrait l'air; ce qui prouve que l'influence de la pression atmosphérique, dont nous parlerons plus tard, ne suffirait pas à expliquer le phénomène.

On peut faire l'expérience d'une autre manière. Avec un instrument bien tranchant on enlève à deux balles de fusil deux segments de petites dimensions et à peu près égaux; et, tandis que les surfaces de section sont encore fraîches et brillantes, on accole les deux balles, en appuyant ces surfaces l'une contre l'autre. La pression que l'on exerce suffit pour que les deux balles adhèrent, et pour que, l'une étant tenue à la main, l'autre, malgré son poids, y reste suspendue.

Puisque les molécules des corps solides, quoique attirées par la cohésion, restent à distance l'une de l'autre et laissent entre elles des vides appelés *pores*, il faut admettre aussi l'existence d'une force répulsive; et lorsque le volume d'un corps solide reste cons-

tant, on peut dire qu'il y a équilibre entre les forces de cohésion et les forces répulsives qui existent entre ses molécules.

C'est aussi par l'existence de cette force répulsive que l'on explique l'élasticité des corps solides. Si, lorsque nous tendons à rapprocher par la pression les molécules d'un corps solide, l'expérience nous apprend qu'elles tendent à revenir à leurs positions, c'est que, par ce rapprochement, la force répulsive augmente plus vite que la cohésion et devient prédominante.

42. **Liquides.** — Dans les liquides la cohésion est beaucoup plus faible que dans les solides. Assez forte encore dans les liquides visqueux, comme l'huile, le goudron, etc., elle devient très-faible dans ceux qui ont une plus grande fluidité, tels que l'eau, l'alcool, etc. Cependant, dans ces liquides eux-mêmes, elle n'est pas nulle. En effet, lorsqu'on plonge une baguette de verre dans l'eau et qu'on l'en retire ensuite, on constate qu'une goutte d'eau reste suspendue à l'extrémité de la baguette. L'attraction du solide pour le liquide ne fait ici que maintenir l'adhérence entre la baguette et la partie supérieure de la goutte, mais c'est la cohésion des molécules liquides qui les maintient unies entre elles.

La faiblesse de la cohésion dans les liquides a pour conséquence la mobilité de leurs molécules : on les sépare l'une de l'autre avec d'autant plus de facilité que le liquide est moins visqueux. Abandonnées à elles-mêmes, les molécules des liquides glissent facilement l'une sur l'autre; c'est ce qui fait qu'ils n'ont pas de forme à eux et qu'ils prennent celle du vase qui les renferme. Quand on fait passer successivement une même masse liquide dans des vases de formes différentes, elle se moule en quelque sorte sur eux en conservant toujours le même volume.

Les liquides sont doués d'élasticité comme les solides. Quand on les enferme dans un vase résistant et qu'on cherche à enfoncer un piston dans leur intérieur, les molécules se rapprochent, et, comme nous l'avons vu à propos des solides, il se développe entre elles des forces répulsives, qui ramènent ces molécules à leurs distances primitives dès que l'effort extérieur cesse d'agir.

De là résulte un double phénomène : d'abord, la compression du liquide; ensuite une tension, qui en est la conséquence, se développe dans toute la masse et fait équilibre à l'effort exercé. C'est la *pression* du liquide.

La compressibilité des liquides, qui est plus grande que celle

des solides, a été longtemps considérée comme nulle, et ce sont les expériences de John Canton (1761), de Jacob Perkins (1819), et d'Œrstædt (1823), qui ont établi l'existence de cette compressibilité. Nous ne parlerons que de celles d'Œrstædt et passerons aussi sous silence celles des physiciens qui, comme M. Regnault, ont déterminé la valeur de la compressibilité des liquides.

Œrstædt se servit d'un appareil qu'il appela *piézomètre*. Il se compose d'un réservoir en verre *a* (fig. 33), surmonté d'un tube capillaire terminé en entonnoir à la partie supérieure. Ce tube, fixé contre une planchette en cuivre, est bien cylindrique, et l'on a tracé à l'avance dans toute sa longueur des divisions équidistantes. Le piézomètre était rempli d'eau, et l'on plaçait dans le petit entonnoir une goutte de mercure. En *d* était un tube rempli d'air et faisant fonction de manomètre (instrument que nous étudierons plus tard et qui sert à mesurer les pressions). L'appareil était ensuite descendu dans une éprouvette de cristal C, qui était montée sur un pied en cuivre H, et qui se terminait à sa partie supérieure par une armature en cuivre portant un petit corps de pompe, dans lequel on pouvait faire descendre un piston à l'aide d'une vis de pression V. L'appareil étant rempli d'eau par l'entonnoir E, on fermait le robinet R et

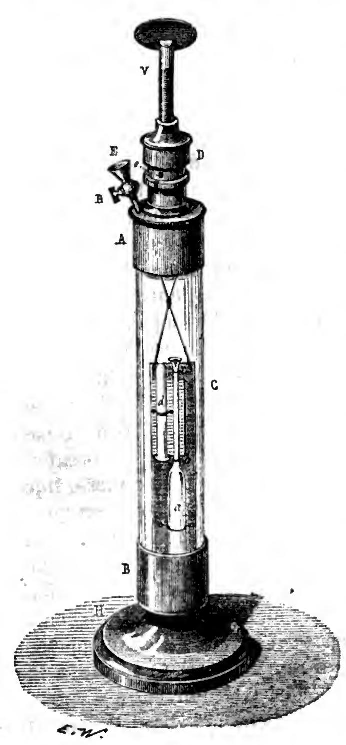


Fig. 33.

l'on faisait descendre le piston. La pression qu'il exerçait se transmettait au liquide du piézomètre, et l'on voyait la goutte de mercure descendre dans le tube capillaire, ce qui prouvait que le liquide se comprimait dans le piézomètre. On recourbe quelquefois la partie supérieure du piézomètre de manière à empêcher le liquide intérieur de s'échapper en glissant entre la paroi du tube et la goutte de mercure.

43. **Gaz.** — Les corps gazeux se rapprochent des liquides par ce caractère que leur forme est essentiellement variable, que leurs molécules sont très-mobiles les unes par rapport aux autres. Mais leur compressibilité est beaucoup plus grande; l'expérience du briquet à air nous a montré la facilité avec laquelle les gaz se compriment. Mais ce qui distingue surtout les liquides des gaz, c'est que ces derniers sont dénués de cohésion, et que leurs molécules sont dans un état de répulsion permanente qui tend à les séparer l'une de l'autre. Dans les liquides, cette répulsion n'existe pas au même degré; de sorte qu'un liquide, tout en prenant la forme du vase qui le renferme, n'en occupe pas nécessairement la totalité.

Que l'on verse un demi-litre d'eau dans un vase vide dont la capacité est un litre, il ne sera rempli qu'à moitié; tandis que si l'on y fait passer un demi-litre d'air, ce gaz remplira le vase tout entier. Il y a plus : non-seulement il le remplira entièrement, mais il tendra sans cesse à augmenter de volume, et cette tendance se traduira par une force exercée sur les parois du vase, force que l'on désigne en physique sous le nom de *pression* ou de *force élastique* des gaz. Pour la mettre en évidence, prenons une vessie fermée par un robinet (fig. 34) et contenant une petite quantité d'air ou d'un gaz quelconque. Mettons-la sous une cloche à robinet *r* placée sur un plateau communiquant par le tube qui la supporte avec une machine, que nous étudierons plus tard sous le nom de machine pneumatique, et qu'actuellement nous regarderons comme capable d'extraire l'air qui se trouve dans la cloche et qui environne la vessie. Faisons fonctionner la machine; la vessie qui était aplatie, dont les parois se tou-

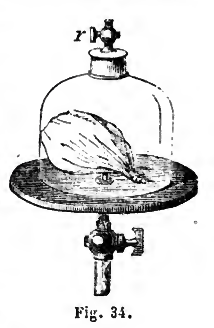


Fig. 34.

chaient presque, se gonfle. Laissons rentrer l'air extérieur en ouvrant le robinet *r*, et la vessie reprend son volume primitif. Il est très-facile d'expliquer cette expérience. Avant qu'on ait fait le vide dans la cloche, la force élastique de l'air contenu dans la vessie ne se manifestait pas, parce qu'elle était contre-balancée par la force élastique de l'air extérieur ; mais dès que ce dernier a été enlevé, l'air contenu dans la vessie a pressé contre ses parois et l'a gonflée. Lorsqu'on a laissé rentrer l'air dans la cloche, il est venu contre-balancer de nouveau par sa pression celle de l'air contenu dans la vessie, et elle s'est affaissée.

Les caractères de ressemblance qui existent entre les liquides et les gaz les font désigner sous le nom de *fluides*.

---

# CHAPITRE III

## HYDROSTATIQUE.

44. L'hydrostatique a pour objet l'étude des fluides à l'état d'équilibre.

En hydrostatique on a l'habitude de considérer les liquides comme incompressibles et comme doués d'une mobilité parfaite. Cette double hypothèse n'est pas absolument vraie ; mais elle ne s'éloigne pas assez de la vérité pour que l'exactitude des résultats auxquels elle conduit soit altérée.

Les fluides sont soumis aux deux principes suivants :

45. 1° **Principe d'égalité de pression.** — Si l'on exerce une pression quelconque en un point de la surface d'un liquide enfermé dans un vase, il en résulte, comme nous l'avons vu, une *pression* qui s'exerce dans tout le liquide. Cette pression est égale sur les deux faces d'une surface élémentaire quelconque prise dans la masse du liquide. De plus, elle est perpendiculaire à cette surface.

C'est en cela que consiste le principe d'*égalité de pression*, qui s'applique aussi aux gaz.

46. 2° **Principe de Pascal ou principe de l'égale transmission des pressions dans tous les sens.** — Le principe suivant, posé par Pascal, sert de base à l'hydrostatique. Il est une conséquence de la mobilité des fluides et de leur parfaite élasticité.

*Si, sur une portion de la surface d'un fluide, on exerce une pression, cette pression se transmet également dans tous les sens.*

Soit (fig. 35) un vase rempli d'eau sur la surface duquel on a percé des ouvertures A, B, C, D, E fermées par des pistons mobiles. Si l'on vient à exercer une pression sur le piston A,

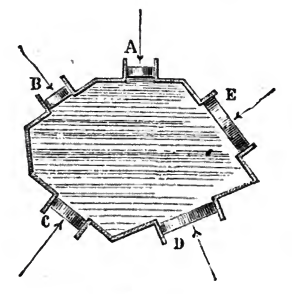


Fig. 35.

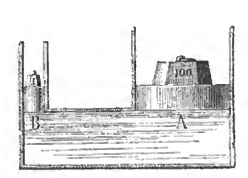


Fig. 36.

elle se transmettra *dans tous les sens sur tous les autres pistons et les soulèvera.* De plus, cette pression se transmet *également*, c'est-à-dire que, si la pression exercée est de 1 gramme sur chaque centimètre carré, chaque centimètre carré de la surface du vase recevra une pression de 1 gramme.

Si on prend un vase plein de liquide et qu'on y pratique deux ouvertures, dont l'une A (fig. 36) a une surface centuple de celle de l'autre B, qu'on place un poids de 1 gramme sur le piston B et un poids de 100 grammes sur le piston A, les poids et les pistons seront en équilibre. Cela n'a rien d'étonnant, car le piston A peut être considéré comme formé de cent petits pistons juxtaposés, et chacun d'eux recevant la pression d'un gramme exercée sur son égal B, le piston A doit recevoir de bas en haut une pression totale de 100 grammes, ce qui fait que, pour le tenir en équilibre, il faut lui appliquer un poids de 100 grammes.

47. **Presse hydraulique.** — La presse hydraulique, imaginée par Pascal, est fondée sur le principe que nous venons d'exposer. Elle permet, à l'aide d'une force relativement faible, d'exercer des pressions considérables.

Concevons deux corps de pompe AB et CD (fig. 37), de sections très-inégales, 1 et 100, par exemple, réunis par un conduit BC. Supposons qu'ils reçoivent chacun un piston et que l'appareil soit complétement rempli d'eau. Exerçons, à l'aide du levier LI, une pression de 10 kilog. sur le petit piston ; il est évident que, sur chaque portion de surface du grand piston égale à celle du petit, il se transmettra une pression de 10 kilog., et comme le grand piston a une surface égale à cent fois celle du petit, on pourra soulever 10 fois 100 kilog., ou 1000 kilog. placés sur le grand, ce qui revient à dire qu'il est soumis de bas en haut à une pression de 1000 kilogrammes.

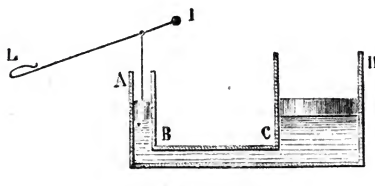


Fig. 37.

Cela posé, voici les principaux détails de l'appareil. Un corps de pompe L (fig. 38), très-solide, est relié par le conduit G à un corps de pompe beaucoup plus petit A : un tube part de la base inférieure de A et plonge, par une pomme d'arrosoir O, au milieu d'un réservoir d'eau M. Le piston de A peut être mis en mouvement par un levier BB'; dès qu'il fonctionne, le liquide de M est aspiré dans le corps de pompe A, puis refoulé par le tube G dans le corps de pompe L. Dans ce dernier descend un piston K portant une tablette HH' capable de glisser verticalement entre les colonnes P, P', qui la maintiennent latéralement. Elle est destinée à recevoir les objets à presser. Une seconde plate-forme II' est fixée sur le haut des colonnes.

Lorsque l'appareil a été rempli d'eau par le jeu de la pompe A, si l'on vient à exercer une pression à l'aide du levier BB' sur le piston de A, elle se transmet sur le piston K, multipliée qu'elle est par le rapport des surfaces. La plate-forme HH' s'élève et vient presser les objets interposés entre elle et II' qui est fixe.

En F on voit un appareil appelé *manomètre*, destiné à mesurer la pression exercée, en D une soupape de sûreté dont le levier est CAD, en E un robinet de décharge.

**48. Applications de la presse hydraulique.** — La presse hydraulique rend chaque jour de grands services à l'industrie. Elle sert à fouler les draps, à extraire l'huile des graines oléagi-

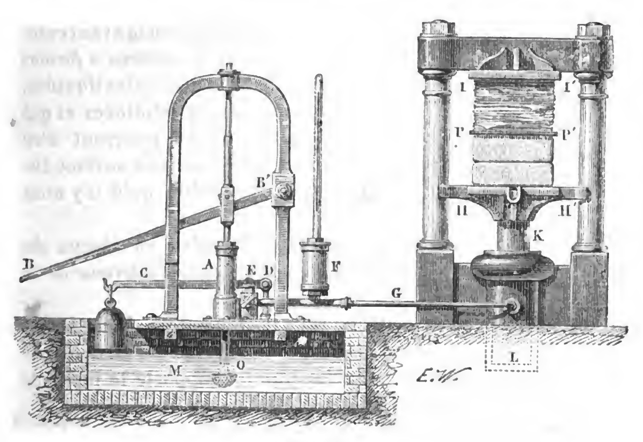



Fig. 38.

neuses, à presser la pulpe de betteraves pour en faire sortir le jus destiné à la fabrication du sucre.

On l'emploie aussi pour essayer les chaudières à vapeur et s'assurer qu'elles ont été construites dans des conditions suffisantes de solidité et de résistance. Pour cela, on les emplit d'eau, et, après avoir fermé toutes les ouvertures moins une, on met cette dernière en communication avec la presse hydraulique; on exerce alors intérieurement une pression supérieure à celle que la chaudière doit supporter dans la pratique, et, si elle résiste à cet essai, on la livre à l'industrie.

**49. Conditions d'équilibre des liquides pesants.** — Pour qu'une masse liquide soumise à l'action de la pesanteur soit en équilibre, il faut qu'elle satisfasse à deux conditions :

1° *La surface du liquide doit être, en chacun de ses points,*

*perpendiculaire à la direction de la pesanteur, c'est-à-dire qu'elle doit être horizontale.*

En effet, supposons un instant qu'il en puisse être autrement et que la surface soit inclinée suivant ACB (fig. 39). Concevons que le liquide qui est situé au-dessous de la couche superficielle se solidifie. Si l'équilibre existe avant cette solidification, il existera *a fortiori* après; mais les molécules liquides, qui n'ont pas été solidifiées et qui sont à la surface, pourront être considérées comme autant de billes placées sur une surface inclinée; elles rouleront de B vers A, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas d'équilibre.

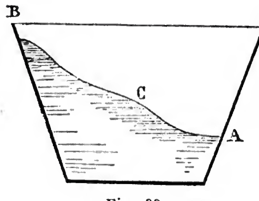


Fig. 39.

2° *La pression exercée par le liquide lui-même en chacun des points d'une même couche horizontale prise dans l'intérieur de la masse est la même partout.*

Nous admettrons ce principe sans le démontrer. Nous ferons seulement remarquer que l'existence de ces pressions est évidente d'elle-même, puisqu'une tranche liquide supporte le poids de toutes les couches situées au-dessus d'elle.

50. **Pressions exercées sur le fond des vases.** — Il est clair, d'après ce que nous venons de dire, que le fond des vases est soumis à une pression de la part du liquide qu'ils contiennent. Cette pression, *quelle que soit la forme du vase*, est égale *au poids d'une colonne liquide cylindrique ayant pour base le fond du vase et pour hauteur sa distance au niveau.*

On peut, pour vérifier ce principe, employer l'appareil de Haldat. Un tube de verre CNB (fig. 40), deux fois recourbé à angle droit, est monté sur une tablette de bois. La partie B porte une garniture en cuivre munie d'un pas de vis qui permet de visser sur elles les vases sans fond A, A′, A″. On introduit dans le tube recourbé du mercure qui s'élève de part et d'autre au même niveau, puis on visse le vase A et on y verse de l'eau jusqu'au niveau marqué par une tige qui n'est point vue sur la figure. Le vase A a évidemment pour fond la couche de mercure sur laquelle repose l'eau. Cette eau, exerçant sa pression sur ce fond mobile, le pousse devant elle et fait monter le mercure jusqu'à un point N

que l'on marque à l'aide d'une bague qui peut glisser le long du tube. En ouvrant ensuite le robinet de décharge B, on fait écouler l'eau, le mercure revient à son niveau primitif et on substitue au vase A le vase A', qui est beaucoup moins large; on le remplit

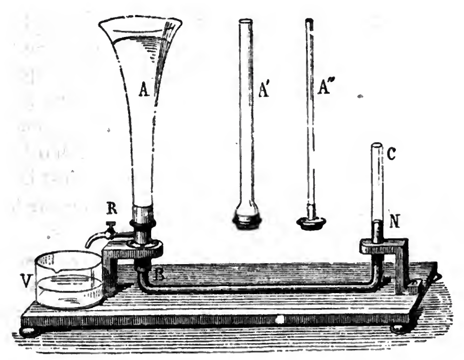



Fig. 40.

jusqu'au niveau marqué par la pointe de la tige, et on constate que le mercure s'élève encore jusqu'à la bague. La même expérience répétée avec le vase A″ conduit à un résultat identique.

On voit donc que la pression exercée sur le fond des vases A, A', A″, est la même, quoiqu'ils contiennent des quantités d'eau bien différentes, pourvu que le liquide s'y élève à la même hauteur. De plus, comme le vase A' est cylindrique et de même section que CNB, on voit que cette pression est égale au poids d'une colonne liquide cylindrique ayant pour base le fond du vase et pour hauteur la distance de ce fond au niveau.

51. **Pressions de bas en haut.** — Lorsqu'on plonge une lame mince au milieu d'un liquide, elle est soumise sur ses deux faces à des pressions égales. On peut le démontrer à l'aide de l'expérience suivante : On applique contre les bords rodés d'un large tube un obturateur ou lame de verre *mn* (fig. 41), puis on plonge l'appareil dans l'eau en soutenant l'obturateur à l'aide d'un fil. Dès que l'appareil est immergé, on constate que l'on peut lâcher le fil, abandonner l'obturateur à lui-même sans qu'il tombe. Il est donc maintenu contre les bords du tube par une pression de bas

en haut. Pour avoir la valeur de cette pression, il suffit de verser de l'eau dans le tube : lorsque le liquide a atteint à l'intérieur le même niveau qu'à l'extérieur, la lame de verre tombe. Mais cela ne doit arriver que lorsque la pression de bas en haut est détruite par une pression égale de haut en bas. Or ici la pression de haut en bas est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le fond du vase et pour hauteur la distance au niveau, et c'est là la valeur de la pression exercée sur la face inférieure de l'obturateur.

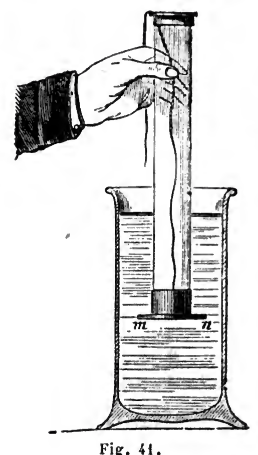


Fig. 41.

52. **Pressions latérales.**—L'expérience précédente, faite avec un tube recourbé dont l'ouverture inférieure est oblique ou verticale, démontre de la même manière l'existence des pressions obliques ou horizontales exercées sur les parois la-

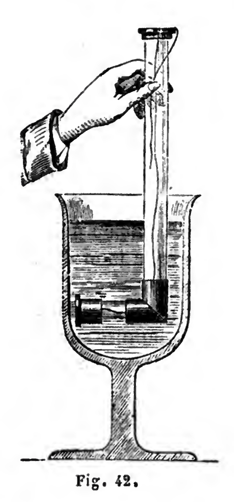


Fig. 42.

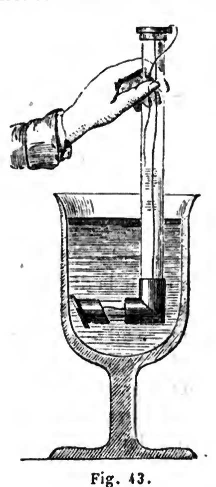


Fig. 43.

térales des vases (fig. 42 et 43). La pression exercée sur une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide cylindrique ayant pour base la paroi considérée et pour hauteur la distance du centre de pression au niveau. Nous admettrons comme démontré que ce centre de pression coïncide avec le centre de gravité de la paroi.

53. **Chariot à réaction.** — La connaissance des pressions latérales sert à expliquer les mouvements de recul que l'on obtient par l'écoulement des liquides. Le chariot à réaction et le tourniquet hydraulique nous en fournissent des exemples.

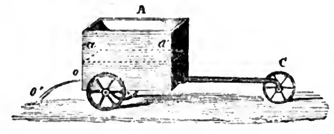


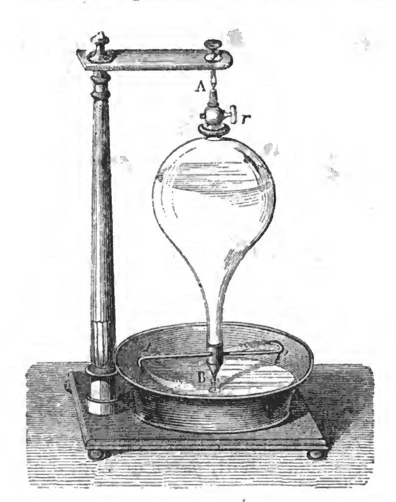
Fig. 44.

Soit (fig. 44) un vase rectangulaire A, en cuivre très-mince, porté sur des roulettes mobiles et présentant sur sa face postérieure une ouverture *o* que nous supposerons d'abord fermée par un bouchon. Considérons les tranches liquides qui sont au niveau de l'ouverture ; elles transmettent dans tous les sens les pressions venant des parties supérieures du liquide. Parmi ces pressions, il en est que nous devons spécialement considérer : c'est celle qui s'exerce sur la base du bouchon, et celle qui, égale et directement opposée à la première, s'exerce sur la surface correspondante de la paroi antérieure du chariot. Lorsque l'ouverture *o* est fermée, ces pressions se détruisent, parce qu'elles tendent à pousser *également* le chariot en sens contraires, et le chariot reste immobile. Mais, dès qu'on enlève le bouchon, le liquide jaillit suivant *oo'*, et le chariot se met en mouvement de la gauche à la droite de la figure. En effet, dès que l'ouverture *o* a été débouchée, la pression qui s'exerçait sur la face postérieure ne peut plus avoir d'autre effet que de faire jaillir le liquide ; mais l'autre, continuant à s'exercer sur la paroi antérieure, met l'appareil en mouvement.

54. **Tourniquet hydraulique.** — Le tourniquet hydraulique se compose d'un réservoir de verre AB (fig. 45) entièrement rempli d'eau et qui peut tourner autour d'un axe vertical. A sa partie inférieure, il communique avec un tube de cuivre *tt'* deux fois recourbé, comme l'indique la figure. Les ouvertures *t* et *t'* étant bouchées, l'appareil reste immobile ; dès qu'on les débouche, il se

met en mouvement dans le sens contraire à celui suivant lequel jaillit le liquide. Il est évident qu'en appliquant aux portions du tube opposées aux ouvertures le raisonnement appliqué tout à l'heure aux parois du chariot à réaction, on expliquera de la même manière le mouvement du tourniquet hydraulique.

55. Nous citerons encore comme application des pressions exercées sur les parois latérales des vases l'expérience du crève-tonneau.



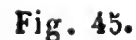



Fig. 45.

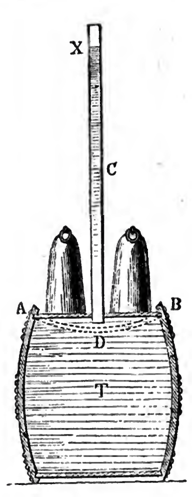



Fig. 46.

neau. Mariotte, dans son *Traité sur le mouvement des eaux*, s'exprime ainsi :

« Ayez un tonneau de bois T large de deux ou trois pieds « (fig. 46), faites une ouverture au fond d'en haut, pour y ajuster « très-exactement un tuyau C d'un pouce de large et de quinze « pieds de hauteur ; mettez sur le fond 7 ou 800 livres de poids « qui le feront courber en concavité, comme ADB, puis versez « de l'eau de façon à remplir le tonneau et ce tuyau étroit jus- « qu'en haut. Quand il sera plein, le fond ADB se sera élevé avec « ses 800 livres, non-seulement à son premier état AB, mais « même il aura pris une figure convexe, » etc.

Cette déformation tient à ce que la paroi supporte de bas en haut une pression égale au poids d'une colonne liquide cylindrique dont elle serait la base et dont la hauteur serait de quinze pieds. En augmentant la longueur du tuyau, on parviendrait à exercer une pression assez considérable pour faire crever le tonneau.

56. **Équilibre des liquides dans les vases communiquants.** — Lorsque deux vases communiquants contiennent un même liquide, ce liquide s'élève dans les deux vases à la même hauteur, et, par suite, les surfaces libres sont dans un même plan horizontal.

Pour démontrer expérimentalement ce principe, on prend un vase de verre A (fig. 47), mastiqué dans un pied de cuivre sur

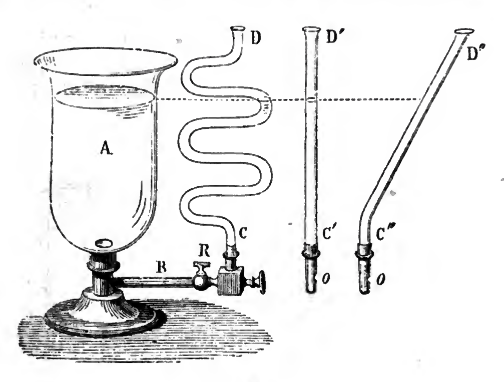



Fig. 47.

lequel s'embranche un tube horizontal creux B. A l'extrémité du tube est pratiquée une ouverture dans laquelle on peut fixer un des tubes CD, C'D', C"D". Un robinet R sert à établir la communication. Le robinet étant fermé, on emplit le vase A d'un liquide coloré, on ouvre le robinet B, le liquide descend en A et monte dans le vase fixé sur le tube B, jusqu'à ce que les niveaux soient tous deux dans le même plan horizontal. L'expérience est la même, quel que soit celui des trois vases CD, C'D', C"D" qui ait été employé.

## APPLICATIONS.

Le principe des vases communiquants donne lieu à un assez grand nombre d'applications.

57. **Jets d'eau.** — Reprenons l'appareil qui nous a servi dans l'expérience précédente, et, au lieu de fixer sur le tube B (fig. 48) des tubes d'une longueur assez grande, fixons-y un tube court C. Dès que le robinet R sera ouvert, le liquide ne pouvant arriver, dans le tube trop court C, au niveau qu'il doit atteindre, s'écoulera par son extrémité ouverte en jaillissant avec d'autant plus de force que la distance entre l'orifice C et le niveau de A sera plus grande.

Lorsqu'on veut établir un jet d'eau dans un jardin ou sur une place publique, on fait arriver dans le fond d'un bassin un tuyau qui communique avec un réservoir élevé, plein d'eau, et l'expérience que nous venons de décrire se reproduit en grand.

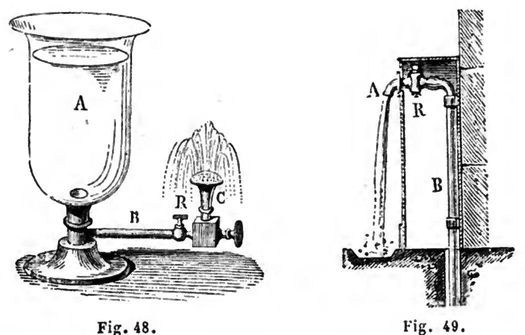


Fig. 48. Fig. 49.

58. Les grandes villes sont le plus souvent alimentées d'eau par des systèmes reposant sur le même principe.

L'eau prise à sa source est lancée par des machines hydrauliques dans des réservoirs très-élevés. Du fond de ces réservoirs partent des tuyaux de conduite qui circulent sous le sol et rayonnent dans tous les quartiers. Sur les tuyaux qui parcourent chaque rue sont greffés d'autres tuyaux qui vont aboutir

dans les fontaines publiques ou privées (fig. 49). L'eau, tendant à atteindre le niveau du réservoir, s'élève dans le tuyau B de la fontaine et jaillit en A.

59. Dans les établissements de bains, les robinets qui desservent chaque baignoire sont souvent alimentés de la même manière. Ils sont fixés à des tuyaux qui communiquent avec des réservoirs élevés où l'eau a été envoyée à l'aide de pompes.

60. **Puits artésiens.** — On nomme ainsi des trous de sonde pratiqués verticalement dans le sol et par lesquels l'eau vient jaillir à une hauteur plus ou moins considérable. Le principe de l'équilibre des liquides dans les vases communiquants va nous permettre d'expliquer ce phénomène. Remarquons pour cela que l'écorce du globe se trouve composée de couches différentes, superposées toujours dans le même ordre et rarement horizontales. Elles se relèvent et s'appuient sur le flanc des montagnes où elles viennent apparaître. Parmi elles, les unes sont perméables à l'eau, les autres ne le sont pas. Supposons qu'une couche imperméable C (fig. 50) se trouve comprise entre deux couches d'ar-

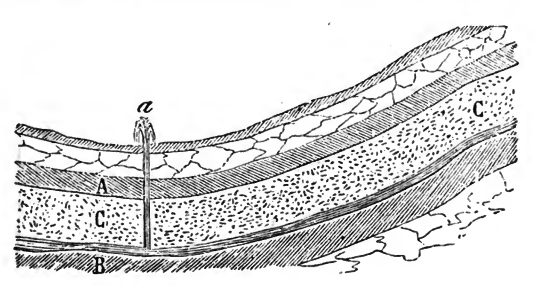


Fig. 50.

gile imperméables A et B. Si la couche C se trouve mise en communication, par des fissures du sol, avec une masse d'eau située sur un lieu élevé, cette eau s'infiltrera, formera une nappe souterraine; et si l'on vient, en un point *a* plus bas que la masse d'eau qui alimente la nappe, à percer un trou de sonde qui aille rejoindre celle-ci, l'eau jaillira en *a* en vertu du principe de l'équilibre des liquides dans les vases communiquants.

Les puits artésiens sont parfois très-profonds, et les eaux qu'ils

fournissent ont alors une température élevée qui est la même en été qu'en hiver. Le puits de Grenelle, à Paris, a 547 mètres de profondeur, et l'eau qui en jaillit a constamment une température de 28°. Le puits de Passy a une profondeur de 586 mètres et fournit aussi de l'eau à 28°.

61. **Sources et rivières.** — Ce qui précède nous permettra d'expliquer l'origine des sources et des rivières. Supposons qu'un plateau élevé soit en communication, par des couches perméables, avec une couche imperméable. L'eau des pluies qui tomberont sur le plateau s'infiltrera à travers les couches perméables jusqu'à ce qu'elle arrive à la couche imperméable ; elle glissera sur elle, et si celle-ci finit par déboucher à l'air libre, il en résultera une source ou une rivière, suivant l'abondance de la nappe liquide.

Les sources jaillissantes ne sont autres que des puits artésiens naturels. Telle est la source de Cléron dans le Doubs.

62. **Niveau d'eau.** — Le niveau d'eau, dont on fait un usage si fréquent dans les opérations du nivellement, est aussi fondé sur le principe des vases communiquants. Il se compose ordinairement (fig. 51) d'un tube de fer-blanc AB recourbé à angle

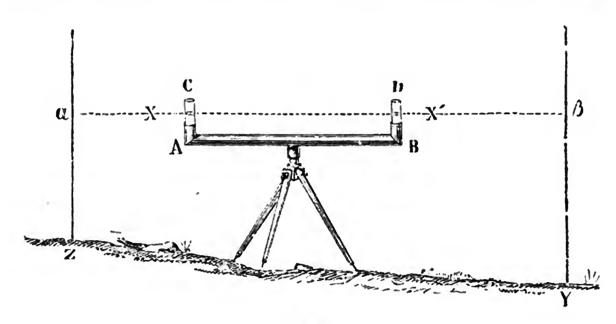


Fig. 51.

droit à ses deux extrémités dans lesquelles sont fixées de petites fioles en verre C et D, sans fond. On place ce tube sur un trépied, dont les branches peuvent s'écarter à volonté et permettent d'installer facilement l'appareil.

Supposons que l'on ait à déterminer la différence de niveau

de deux points Z et Y. L'opérateur, après avoir établi le niveau en un point d'où il puisse apercevoir des règles verticales divisées, placées en Z et Y, verse dans l'appareil de l'eau, qui s'élève dans les deux fioles jusqu'à un même plan horizontal XX', et c'est à ce plan qu'il va rapporter ses observations. Il met d'abord l'œil en X, et s'alignant sur XX' fait signe à l'aide qui tient la règle divisée en Y d'élever ou d'abaisser une plaque mobile qui glisse le long de cette règle (fig. 52). Lorsqu'un trait tracé sur cette plaque est arrivé dans le plan XX', l'opérateur fait un signe d'arrêt, et l'aide lit sur la règle la distance βY qui marque l'élévation du plan XX' au-dessus de Y. Plaçant ensuite l'œil en X' et s'alignant sur X, il répète la même opération pour une règle placée en Z; soit αZ la longueur lue, elle représente l'élévation de XX' au-dessus de Z; la différence entre βY et αZ représente évidemment la différence de niveau des deux points Y et Z.

Fig. 52.

63. **Lampes.** — Dans les lampes connues sous le nom de lampes astrales et de quinquets, le niveau de l'huile s'établit dans le bec en vertu du principe de l'équilibre des liquides dans les vases communiquants.

La lampe astrale se compose d'un réservoir à huile en forme de couronne *aa* (fig. 53). De ce réservoir partent des tubes *b*, *b* qui vont s'embrancher sur un tube vertical servant de bec. On comprend que le réservoir, les tubes *b*, *b* et le bec formant un système de vases communiquants, l'huile, pour être en équilibre, doit s'élever dans le bec au même niveau que dans le réservoir. Pour qu'une lampe fonctionne régulièrement, il est nécessaire que le niveau de l'huile dans la mèche soit constant. Ici il est évident qu'à mesure que le liquide brûle, le niveau baisse; mais comme le réservoir a de très-petites dimensions dans le sens vertical, tandis qu'il est très-étendu dans le sens horizontal, la variation n'est pas très-sensible.

Toutefois, pour éviter cet inconvénient, on a employé la disposition suivante dans les quinquets.

Le réservoir *bb* (fig. 54), qui fournit l'huile au bec, est ouvert à sa partie supérieure et contient un second réservoir *a* renversé; la tubulure de ce vase *a* vient affleurer au niveau du liquide dans

le réservoir *bb*. L'équilibre s'établit par le tube *d*, et l'huile arrive dans la mèche. Dès que la combustion en a absorbé une certaine quantité, le niveau baisse en *bb*, mais immédiatement la

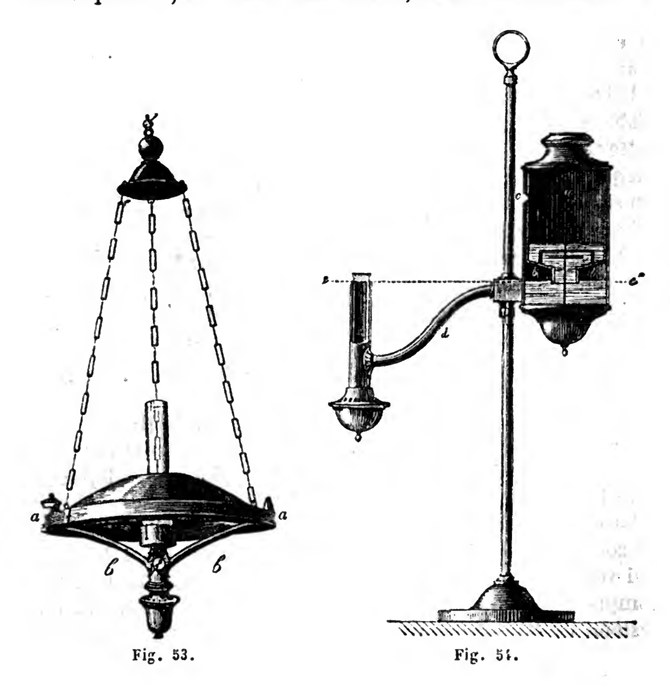



Fig. 53. Fig. 54.

tubulure se trouve à découvert, une bulle d'air rentre dans *a*, fait écouler de l'huile et rétablit le niveau en *bb*.

64. **Écluses.** — Lorsqu'on veut effectuer des transports par eau et que le pays n'a pas de rivières navigables, on creuse ordinairement des canaux. Ces canaux ont en général une pente faible, de manière que l'eau s'y écoule avec une vitesse à peu près égale à celle que l'on observe dans les rivières. Pour qu'il puisse en être ainsi dans un pays accidenté, où l'eau se trouverait souvent à une trop grande distance au-dessous du sol voisin, on forme le canal de plusieurs parties, qui sont à la suite l'une de l'autre et dans

lesquelles l'eau est à des niveaux différents. Ces parties sont réunies par des écluses qui servent à faire passer les bateaux d'un niveau à l'autre. Soient A et B (fig. 55), les parties du canal

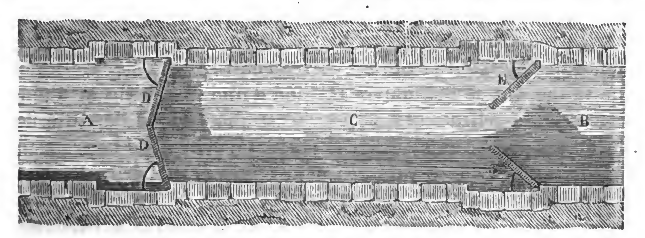



Fig. 55.

situées à des niveaux différents; soit A, la partie supérieure appelée bief supérieur; soit B le bief inférieur. On les sépare l'un de l'autre par un bout de canal C appelé *écluse*, dont les parois

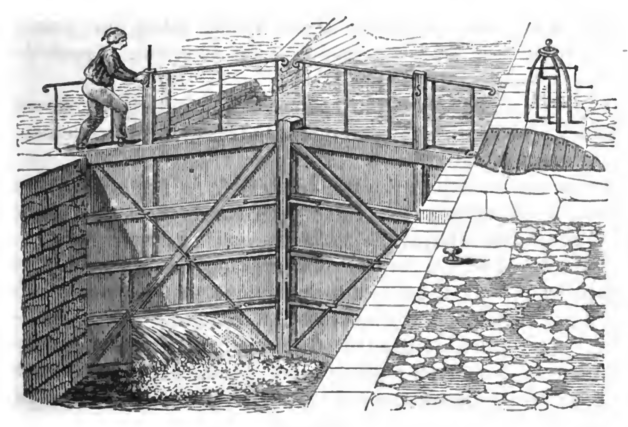


Fig. 56.

sont en maçonnerie et qui est séparée de A et de B par des portes D et E.

Pour faire passer un bateau du bief inférieur B dans le bief supérieur A, on ferme les portes D et on ouvre les portes E. Le

niveau s'établit alors à la même hauteur en B et en C; le bateau est amené en C; lorsqu'il est dans l'écluse, on ferme E et on ouvre D; le niveau s'élève alors en C, devient le même qu'en A, et le bateau peut continuer sa route.

Nous remarquerons qu'au lieu d'ouvrir la porte D, on commence, pour établir l'égalité de niveau entre A et C, par soulever une vanne qui se manœuvre à l'aide d'une manivelle et d'une crémaillère verticale (fig. 56). Ce n'est que lorsque l'égalité de niveau est établie qu'on ouvre la porte. On évite ainsi la pression énorme qu'il faudrait vaincre, pour ouvrir cette porte, lorsque le niveau est plus élevé en A qu'en C.

Le lecteur comprendra facilement la manœuvre à exécuter pour faire au contraire passer un bateau du bief supérieur A dans le bief inférieur B.

## PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

65. *Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale de bas en haut égale au poids du volume liquide déplacé.*

Ce principe, dont la découverte est due à Archimède[1], savant géomètre de l'antiquité, peut se démontrer expérimentalement de la manière suivante :

On se sert de deux cylindres de cuivre A et B (fig. 57). A est creux, B est plein, et le volume extérieur de B est justement égal au volume intérieur de A. On suspend le cylindre plein au-dessous du cylindre A, et on accroche le tout au-dessous de l'un des plateaux M d'une balance hydrostatique. Cette balance a ceci de particulier que la colonne creuse E renferme une crémaillère F qui soutient le fléau GH. Cette crémaillère peut être mise en mouvement par un pignon C, qui engrène avec elle. On voit que, par cette disposition, le fléau et les plateaux peuvent être élevés ou abaissés à volonté. On met des poids dans le plateau M' pour faire équilibre aux cylindres A, B, puis on descend le fléau de manière que le cylindre B plonge tout entier dans un vase V rempli d'eau. L'équilibre est rompu et le fléau s'incline

[1] Archimède, né à Syracuse, vers l'an 287 avant J.-C., mort en défendant sa ville natale, 212 avant J.-C.

du côté de M'. Ce premier fait nous montre l'existence d'une poussée, exercée de bas en haut sur le cylindre immergé B. Pour rétablir l'horizontalité du fléau, c'est-à-dire pour détruire l'effet de la poussée, il suffit de remplir d'eau le cylindre A. Or,

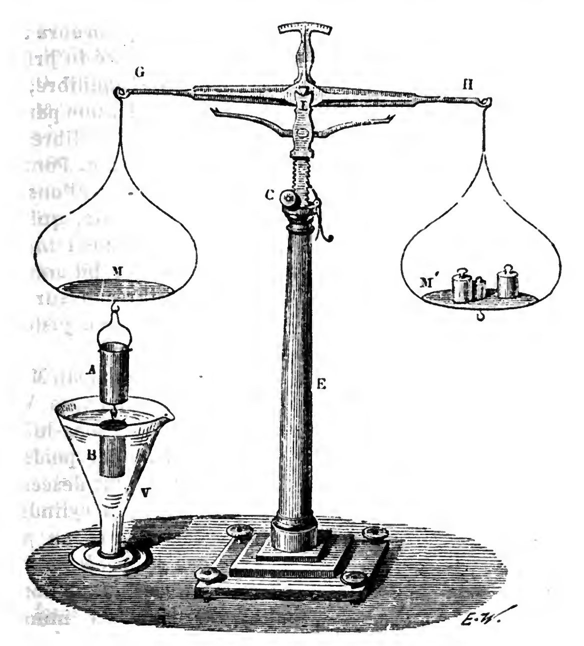



Fig. 57.

son volume étant égal au volume extérieur de B, et, par suite, au volume d'eau déplacé par ce dernier, il en résulte que la poussée est égale au poids du volume liquide déplacé par le corps immergé.

On énonce souvent, comme il suit, le principe d'Archimède :

Tout corps plongé dans un liquide *perd une partie de son poids* égal au poids du volume liquide déplacé. C'est là un énoncé dont la forme est vicieuse, car le poids du corps ne varie pas

dans l'expérience, seulement une force nouvelle, la poussée, vient détruire *l'effet d'une partie de ce poids.*

66. Il est intéressant d'examiner si un corps étant placé dans l'un des plateaux d'une balance à côté d'un vase contenant de l'eau, et l'équilibre étant établi à l'aide de poids placés dans l'autre plateau, cet équilibre sera rompu par le fait qu'on aura mis le corps dans l'eau. En interprétant à la lettre l'énoncé du principe d'Archimède, on pourrait croire à la rupture de l'équilibre, puisque la poussée agissant sur le corps détruit l'effet d'une partie de son poids. Cependant l'expérience montre que l'équilibre n'est pas rompu lorsque le corps a été introduit dans le vase. Pour nous rendre compte de cette anomalie apparente, nous allons faire l'expérience suivante, qui nous prouvera qu'en même temps que le corps immergé subit une poussée verticale, il réagit sur le liquide avec une force justement égale et contraire.

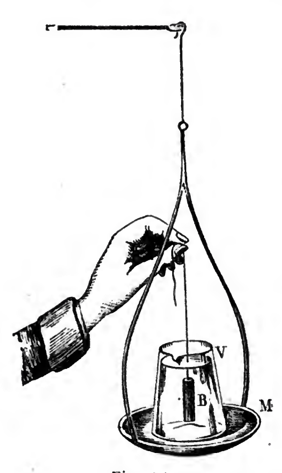


Fig. 58.

Plaçons dans le plateau M d'une balance (fig. 58) un vase V contenant de l'eau ; faisons-lui équilibre en mettant des poids dans l'autre plateau, puis descendons dans le liquide un cylindre B, *en le soutenant avec un fil, de manière que son poids ne s'exerce pas sur la balance.* L'horizontalité du fléau est immédiatement détruite ; il s'incline du côté du plateau M. Or, pour expliquer ce fait, comme le corps B ne pèse pas sur le plateau, il faut admettre qu'en même temps qu'il subit de la part du liquide une poussée verticale, il réagit à son tour sur ce dernier. On aura la mesure de la réaction en déterminant le poids d'eau qu'il faut enlever du vase V pour rétablir l'équilibre ; or l'expérience prouve qu'il faut en retirer une quantité dont le poids est égal au poids du volume liquide déplacé.

## APPLICATIONS.

Le principe d'Archimède donne lieu à de nombreuses applications.

67. Lorsqu'un corps est plongé dans le liquide, il peut arriver trois choses : ou bien il se rend au fond du vase qui contient le liquide, ou bien il reste où on le place au milieu de la masse, ou enfin il flotte à la surface. Le premier cas arrive lorsque le corps, à égalité de volume, pèse plus que le liquide, ou, comme nous le dirons plus tard, lorsque sa densité est plus grande que celle du liquide. Le second cas se présente lorsque la densité du corps immergé et du liquide sont égales ; le troisième, lorsque celle du liquide est supérieure à celle du corps.

Dans les cours on réalise souvent ces trois cas de la manière suivante. On prend trois vases V, V′, V″ (fig. 59). Dans le premier

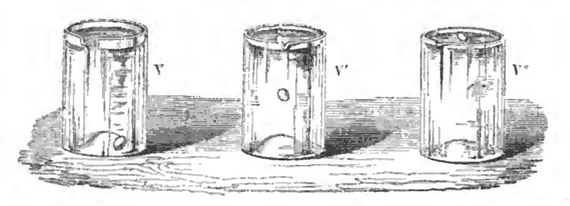



Fig. 59.

V on met de l'eau ordinaire et on y abandonne un œuf qui va au fond du vase, parce que, la densité de l'eau étant moins grande que celle de l'œuf, la poussée subie par ce dernier est inférieure à son poids, et qu'il tombe en vertu de la différence des deux forces. Dans le vase V′, on met de l'eau dans laquelle on a fait dissoudre du sel en quantité telle que la densité du liquide soit égale à celle de l'œuf. L'œuf, abandonné au milieu de la solution, reste où on le place, parce que le poids et la poussée se font équilibre. Enfin dans le vase V″, on introduit de l'eau dans laquelle la proportion de sel a été augmentée, de manière à rendre la densité plus grande que celle de l'œuf. Un œuf, abandonné au milieu du liquide, remonte à la surface, parce que la poussée qu'il subit est supérieure à son poids. Lorsqu'il est en équilibre, il est

évident que la partie qui reste immergée déplace un volume liquide dont le poids est justement égal au poids de l'œuf tout entier.

68. Le corps de l'homme, étant plus dense que l'eau, ne peut flotter au milieu d'elle sans faire de mouvements. Mais lorsqu'on augmente le volume d'eau déplacé sans changer sensiblement le poids du corps, on peut flotter sans faire de mouvements. C'est ce qui arrive lorsqu'on s'attache sous les bras des vessies pleines d'air ou des morceaux de liége, ou encore lorsqu'on se sert des ceintures de natation, qui ne sont autres que des sacs de caoutchouc gonflés d'air.

Les cadavres des noyés remontent à la surface de l'eau au bout d'un certain temps, parce que la putréfaction produit des gaz qui gonflent les tissus et augmentent le volume du corps sans en changer sensiblement le poids.

69. On explique encore, au moyen du principe d'Archimède, le mécanisme à l'aide duquel les poissons peuvent descendre ou s'élever à volonté dans l'eau. Ces animaux possèdent presque tous une poche remplie d'air, placée dans l'abdomen, sous l'épine dorsale, et appelée *vessie natatoire*. Cette vessie peut être plus ou moins comprimée par le mouvement des côtes, et suivant le volume qu'elle occupe, le volume d'eau déplacé a un poids supérieur, égal ou inférieur à celui du poisson, ce qui fait que ce dernier monte, reste en équilibre ou descend au milieu du liquide.

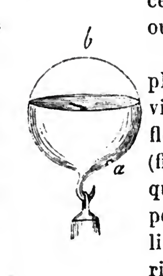



Fig. 60.

70. **Ludion.** — Un appareil de physique appelé *Ludion* peut servir aussi à réaliser les divers cas du flottage des corps. Il se compose (fig. 60) d'un vase en verre presque rempli d'eau et fermé par une peau de vessie. Dans l'intérieur du liquide se trouve une petite figurine en émail suspendue au bout d'une boule de verre *b* qui est creuse et présente un petit trou *a*. La quantité d'air laissée dans la boule est telle que le petit flotteur se soutienne au sommet du liquide. Mais, dès qu'on presse avec le pouce sur la membrane qui ferme l'éprouvette, l'air situé entre elle et le liquide est

comprimé ; cet excès de pression se transmet par le liquide à l'orifice *a*, et une nouvelle quantité d'eau entre dans la boule *b*, en comprimant l'air situé à sa partie supérieure. Le flotteur devient alors plus lourd que le liquide déplacé et descend. Dès qu'on cesse d'appuyer sur la membrane, l'air de la boule, réagissant par sa force élastique, chasse l'excès d'eau, et la figurine remonte. On peut, par une pression ménagée, faire entrer ce qu'il faut de liquide pour maintenir la figurine en équilibre au milieu de l'eau.

71. **Navires. Bateaux.** — Les navires et les bateaux dont on se sert pour effectuer des transports par eau sont des corps flottants que soutient la poussée du liquide. Un navire s'enfonce dans l'eau jusqu'à ce qu'il déplace un poids d'eau égal à son propre poids. Aussi s'enfonce-t-il d'autant plus que son chargement est plus considérable.

Lorsque nos marins ont à porter au delà des mers des chargements de marchandises, s'ils ne trouvent pas, après avoir déchargé ces marchandises, de nouvelles matières à rapporter en France, ils sont obligés de lester leur navire, c'est-à-dire d'emplir la cale avec une quantité plus ou moins grande de corps lourds, sable, cailloux, galets, etc.

Lorsqu'un navire doit effectuer son voyage, partie par mer, partie dans un fleuve, il doit être chargé de manière à ne pas trop s'enfoncer dans l'eau douce. Si on le chargeait seulement en vue de son parcours dans la mer, comme l'eau de mer est plus dense que l'eau douce, le navire pourrait sombrer en arrivant dans le fleuve.

72. On a souvent appliqué le principe d'Archimède pour opérer le sauvetage d'objets submergés, comme les débris d'un vaisseau. Parmi les moyens employés, nous citerons le suivant, qui consiste à attacher à ces débris des tonneaux pleins d'eau dont l'ouverture est en dessous ; puis, avec des pompes et des tuyaux flexibles, on refoule de l'air dans l'intérieur des tonneaux. Cet air chasse l'eau et les tonneaux devenant moins lourds que le volume d'eau qu'ils déplacent, la poussée les soulève et les amène à la surface, ainsi que les objets auxquels ils ont été attachés.

73. Lorsqu'un navire ne peut pas pénétrer dans un port faute d'eau, on se sert pour le soulever de bateaux plats nommés *chameaux*. Des câbles passant sous la quille du navire vont s'attacher

sur les bateaux plats à des machines appelées cabestans. A l'aide de ces machines on peut soulever le navire, dont le poids porte maintenant en partie sur les chameaux. Lorsqu'il est suffisamment soulevé, on le fait entrer dans le port en même temps que les chameaux.

74. Nous trouvons encore une application du principe d'Archimède dans le moyen employé autrefois par les Égyptiens pour le transport de leurs obélisques. Lorsqu'un obélisque avait été taillé dans la carrière, on creusait un canal au-dessous de lui (fig. 61), de manière qu'il ne touchait plus le sol que par

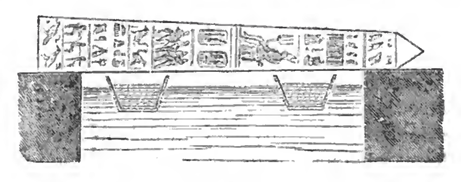


Fig. 61.

ses extrémités. Ce canal se remplissait d'eau pendant la crue du Nil. On faisait alors arriver sous l'obélisque des bateaux portant une charge de briques suffisante pour les maintenir enfoncés jusque près de leurs bords. On enlevait les briques, les bateaux diminuant de poids s'élevaient peu à peu sous l'influence de la poussée et soulevaient l'obélisque que l'on transportait ensuite à destination, où on le déposait en faisant enfoncer les bateaux par un nouveau chargement de briques.

75. Le régulateur à eau, le sifflet d'alarme des machines à vapeur, sont encore deux applications du principe d'Archimède, sur lesquelles nous reviendrons plus tard.

76. Les robinets à flotteur qui servent à maintenir un niveau constant dans un réservoir, sont aussi fondés sur ce principe. A la surface du liquide du réservoir flotte une sphère creuse munie d'une tige qui est fixée à la clef d'un robinet destiné à amener le liquide. A mesure que le niveau s'élève, le flotteur s'élève aussi, et les choses sont disposées de telle manière que, lorsque le liquide est arrivé au niveau qu'il ne doit pas dépasser, le robinet se trouve fermé. Dès que le niveau baisse, le flotteur descend et ouvre à nouveau le robinet.

77. **Détermination du volume d'un corps.** — Lorsqu'on ne peut déterminer facilement par la géométrie le volume d'un corps, on peut le faire en s'appuyant sur le principe d'Archimède, pourvu que ce corps ne soit pas soluble dans l'eau. On le suspend au-dessous de l'un des plateaux d'une balance et on lui fait équilibre en mettant des poids ou des corps quelconques dans l'autre plateau. Cela fait, on approche au-dessous de lui un vase contenant de l'eau au milieu de laquelle on le fait plonger. L'équilibre est rompu par la poussée, et pour le rétablir, il faut ajouter dans le plateau situé au-dessus du corps des poids qui représentent le poids du volume d'eau déplacé, et par suite le volume cherché. Si on a dû ajouter $1^k,468$, le volume du corps est de 1 décimètre cube, 468 centimètres cubes, puisque le kilogramme est le poids de 1 décimètre cube d'eau et le gramme le poids de 1 centimètre du même liquide.

78. **Conditions d'équilibre des fluides superposés.** — Lorsqu'on mélange dans un vase des fluides de densités différentes, ces fluides se superposent par ordre de densités, les plus denses allant au fond du vase. La surface de séparation des fluides est un plan horizontal. Pour démontrer cette proposition par l'expérience, on se sert de la fiole des quatre éléments (fig. 62).

Fig. 62.

On met dans un flacon du mercure, de l'eau, de l'huile et de l'air : on agite alors le mélange, et, au bout d'un certain temps, on constate que les fluides se sont séparés et se sont superposés dans l'ordre où nous venons de les énumérer, le mercure se trouvant au fond du vase. Les surfaces de séparation des quatre fluides sont horizontales.

79. Applications du principe précédent. — A l'embouchure des fleuves, l'eau de mer, en vertu de sa plus grande densité, s'étend souvent sous l'eau douce à une certaine distance. C'est ce qui a été constaté par Stevenson sur la rivière de Dee dans le port d'Aberdeen et à l'embouchure de la Tamise. Franklin avait déjà signalé ce résultat à propos des rivières de l'Amérique.

80. Certaines personnes mettent une couche d'eau et une couche d'huile dans le godet des veilleuses qui les éclairent

pendant la nuit. L'huile reste à la surface en vertu de sa densité plus faible et alimente la mèche.

81. On peut faire brûler de l'alcool à la surface de l'eau. Qu'on prenne un verre presque entièrement rempli d'eau (fig. 63), qu'on verse à la surface de l'eau une couche d'alcool, elle y restera en vertu de sa densité qui est plus faible, et on pourra faire brûler le liquide inflammable.

Fig. 63.

Lorsqu'on verse un sirop dans l'eau, il faut, pour avoir un liquide homogène, agiter le mélange, sans quoi le sirop va au fond du vase et y reste. Il en est de même lorsqu'on sucre un liquide, eau, café, etc. Les morceaux de sucre gagnent la partie inférieure du vase, s'y dissolvent, et le liquide acquérant en ces points une densité plus grande, le mélange ne s'effectue pas; si l'on ne prend soin d'agiter, la partie supérieure ne présente qu'une saveur sucrée à peine sensible.

82. **Niveau à bulle d'air.** — Le niveau à bulle d'air dont on se sert pour vérifier l'horizontalité d'un plan est encore une application du principe précédent. Il consiste en un tube de verre légèrement bombé, suivant l'arête AB (fig. 64). Sa courbure doit être circulaire. Le long de l'arête AB sont tracées des divisions

Fig. 64.

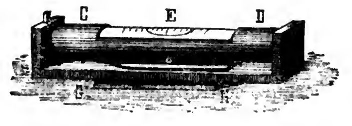



Fig. 65.

équidistantes. On l'emplit d'eau ou d'alcool en laissant une bulle d'air, et on le ferme à ses deux extrémités. Le tube de verre est contenu dans une gaîne de cuivre (fig. 65) fixée sur une planchette plane de même métal. La bulle d'air, en vertu de sa légèreté, tend toujours à occuper la partie la plus élevée du tube. L'instrument est réglé de manière que lorsqu'il repose sur un plan horizontal, la bulle s'arrête exactement au zéro de la gra-

duation. Pour vérifier l'horizontalité d'un plan quelconque, il suffit d'y placer l'instrument dans deux positions non parallèles et de s'assurer que, dans chacune de ces positions, le milieu de la bulle s'arrête au zéro.

---

# CHAPITRE IV

## DENSITÉS OU POIDS SPÉCIFIQUES.

83. Tout le monde sait que les différents corps pris sous le même volume ne pèsent pas le même poids, que le plomb est plus lourd que le liége, que l'huile est plus légère que l'eau, et les physiciens ont cherché depuis longtemps à déterminer les rapports qui existent entre les poids des différentes substances prises sous le même volume.

On appelle densité relative ou poids spécifique relatif d'un corps *le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce corps et le poids du même volume d'eau.*

Comme le poids que présente un corps sous un volume déterminé est susceptible de varier, suivant qu'on l'échauffe ou qu'on le refroidit, on est convenu de fixer les circonstances dans lesquelles sera prise la densité. On prendra le corps à la température de zéro, et l'eau à la température de 4° du thermomètre centigrade. Nous remarquerons que le nombre qui exprime le poids d'un certain volume d'eau à 4° est aussi celui qui exprime son volume, puisqu'en France le gramme, *unité de poids*, est le poids du centimètre cube d'eau, *unité de volume*. Il résulte de ce qui précède que l'on dit quelquefois que la densité d'un corps est le rapport de son poids à son volume.

84. **Détermination des densités.** — On emploie trois méthodes principales pour déterminer les densités des corps solides et liquides : 1° La méthode de la balance hydrostatique ; 2° la méthode du flacon ; 3° la méthode des aréomètres.

Ces trois méthodes reviennent toutes à la détermination successive des deux termes du rapport qui exprime la densité : *poids d'un certain volume du corps soumis à l'expérience, poids du même volume d'eau.*

Dans toutes les opérations que nous allons décrire, nous supposerons que le corps et l'eau sont pris à la même température, et nous laisserons de côté les corrections que l'on doit faire lorsqu'on veut les ramener aux températures que nous avons indiquées plus haut. Ces corrections, quand il s'agit des solides et des liquides, ne portent du reste que sur des chiffres décimaux d'un ordre plus élevé que les centièmes.

### 1° MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE.

85. **Solides.** — On suspend le corps solide, un morceau de fer, par exemple, au-dessous de l'un des plateaux de la balance hydrostatique, à l'aide d'un fil assez fin pour que son poids soit négligeable, et on détermine le poids du corps par la double pesée. Supposons qu'il pèse 38$^{gr}$,61. On place au-dessous de lui un vase plein d'eau dans lequel on le fait plonger ; l'équilibre est rompu par la poussée, et, pour le rétablir, il faut ajouter des poids dans le plateau au-dessous duquel est suspendu le morceau de fer, soit 4$^{gr}$,95. Ces poids représentant la poussée représentent par suite le poids du volume d'eau égal au volume du morceau de fer. Donc en divisant 38,61 par 4,95, on aura la densité de fer, qui est 7,8.

86. **Liquides.** — On suspend au-dessous de l'un des plateaux de la balance une boule de verre, et on lui fait équilibre par de la tare mise dans l'autre plateau. Puis on la plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, soit l'alcool. L'équilibre est rompu, et on est obligé, pour le rétablir, de mettre dans le plateau au-dessous duquel est suspendue la boule de verre des poids qui représentent le poids d'un volume d'alcool égal au volume de la boule, soit 39$^{gr}$,7. Après avoir essuyé le morceau de verre, on répète la même opération avec de l'eau, et les poids gradués ajoutés dans ce cas pour rétablir l'équilibre rompu par l'immersion donnent le poids d'un volume d'eau égal au volume de la boule, soient 50$^{gr}$. La densité de l'alcool s'obtient en divisant 39,7 par 50 : elle est égale à 0,784.

## 2° MÉTHODE DU FLACON.

Cette méthode est due à Klaproth qui vivait à la fin du siècle dernier.

87. **Liquides.** — On pèse d'abord par la double pesée le corps dont on veut déterminer la densité, un morceau d'aluminium, par exemple. Supposons qu'il pèse 26$^{gr}$,312. On le place ensuite dans un des plateaux d'une balance à côté d'un flacon plein d'eau (fig. 66), et fermé par un bouchon à l'émeri. Ce bouchon est percé d'un petit trou capillaire, jusqu'au sommet duquel s'élève le liquide intérieur. L'équilibre étant établi par de la tare mise dans l'autre plateau, on enlève le flacon, on y introduit le corps qui en fait sortir un volume d'eau justement égal au sien. On essuie bien le flacon et on le remet en place ; l'équilibre est rompu, puisqu'une certaine quantité d'eau est sortie du flacon. Pour rétablir l'horizontalité du fléau, il faut ajouter des poids gradués qui représentent le poids d'un volume d'eau égal au volume du morceau d'aluminium, soient 10$^{gr}$,525. En divisant 26$^{gr}$,312 par 10$^{gr}$,525, on a la densité de l'aluminium qui est égale à 2,5.

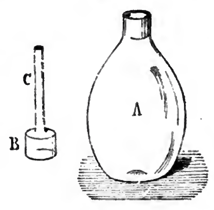


Fig. 66.

88. **Solides.** — On se sert ordinairement pour les liquides de petits flacons dont l'usage a été introduit par M. V. Regnault. Ils se composent d'un réservoir sphérique ou cylindrique A (fig. 67) surmonté d'un tube capillaire et d'une autre partie plus large qui sert d'entonnoir. On met sur l'un des plateaux de la balance le flacon plein du liquide sur lequel on veut opérer, d'acide sulfurique par exemple. On en fait la tare, puis on vide le flacon et on le sèche avec soin ; on le replace sur la balance, et les poids qu'il faut ajouter à côté de lui pour rétablir l'équilibre représentent le poids d'un volume d'acide sulfurique égal à celui du flacon, soit par exemple 36$^{gr}$,8. On répète la même opération avec l'eau, soit 20$^{gr}$ le résultat de la nouvelle pesée. Il est évident qu'en divisant 36$^{gr}$,8 par 20$^{gr}$, on aura la densité 1,84 de l'acide sulfurique,

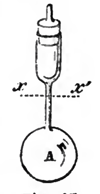


Fig. 67.

puisque ces poids représentent les poids de volumes égaux d'eau et d'acide sulfurique. Pour être sûr d'opérer dans les deux phases de l'expérience sur le même volume de liquide, on ne remplit le flacon que jusqu'à un trait $xx'$ tracé sur le col.

### 3° MÉTHODE DES ARÉOMÈTRES.

89. Dans le cas où l'on n'a pas de balance à sa disposition, les méthodes précises que nous venons d'indiquer ne sont pas applicables. On peut alors se servir de petits instruments appelés *aréomètres*, dont la théorie est l'application du principe de l'équilibre des corps flottants.

Parmi ces aréomètres, les uns portent un trait de repère appelé trait d'affleurement, jusques auquel on fait enfoncer l'instrument en lui donnant une surcharge suffisante : ce sont les aréomètres *a volume constant et à poids variable.* Les autres, uniquement destinés à la comparaison des densités, conservent toujours le même poids et s'enfoncent d'autant moins que le liquide dans lequel on les plonge est plus dense. Pour permettre de juger facilement de la quantité dont ils s'enfoncent, ils portent ordinairement une graduation. Ces instruments s'appellent *aréomètres à volume variable et à poids constant.*

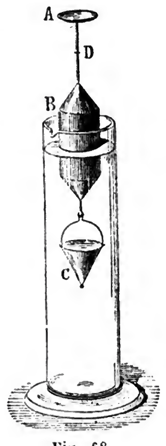


Fig. 68.

90. **Aréomètre ou balance de Nicholson**[1]. — L'aréomètre ou balance de Nicholson est spécialement employé pour prendre des densités de corps solides.

Il se compose d'un cylindre en cuivre ou en fer-blanc vernissé (fig. 68), terminé par des cônes. Le cône supérieur porte une tige surmontée par un plateau A. En D est le *trait d'affleurement.* Le cône inférieur soutient, à l'aide d'un crochet, une corbeille C qui contient sous un double fond des grains de plomb destinés à lester l'appareil, de manière qu'il se tienne vertical dans l'eau, mais

[1] Nicholson, physicien anglais, né à Londres en 1753, mort en 1815.

qu'il n'enfonce pas jusqu'au trait d'affleurement. Soit à déterminer la densité d'un morceau de marbre. On le place sur le plateau A avec de la grenaille de plomb, jusqu'à ce que l'instrument affleure en D; puis on le retire, l'affleurement cesse, et, pour le rétablir, on met en A des poids gradués qui représentent évidemment le poids du corps, soient 11gr,70. Puis, après avoir retiré les poids gradués du plateau A, on soulève l'aréomètre et on met le morceau de marbre dans la corbeille C; on replonge l'aréomètre dans l'eau, l'affleurement n'existe plus, puisque l'instrument subit en plus la poussée de l'eau sur le morceau de marbre. Pour détruire l'effet de cette poussée, on ajoute des poids en A jusqu'à ce que l'affleurement soit rétabli, soient 5gr. Ils représentent évidemment le poids du volume d'eau déplacé par le morceau de marbre. En divisant 11gr, 70 par 5gr, on aura la densité du marbre qui est égale à 2,34.

91. **Aréomètre de Fahrenheit.** — Fahrenheit [1] a imaginé un aréomètre qui sert à mesurer la densité des corps liquides. Comme il est destiné à être plongé dans des liquides dont quelques-uns pourraient attaquer les métaux, on le fait ordinairement en verre. Il se compose d'une partie renflée B (fig. 69), terminée par une boule C remplie de mercure ou de grenaille de plomb destinée à lester l'appareil. La partie supérieure présente une tige portant un plateau A. En D se trouve le point d'affleurement.

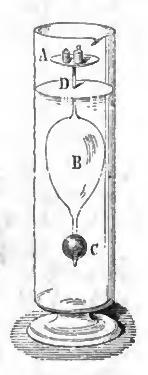


Fig. 69.

Le poids de l'instrument étant connu à l'avance, soient 200gr, on le plonge dans le liquide dont on veut déterminer la densité, l'acide nitrique par exemple. Supposons que, pour le faire affleurer, il faille ajouter 48gr sur le plateau A. 200gr plus 48gr ou 248gr représentant le poids de l'aréomètre et des poids qu'il supporte, représentent évidemment le poids d'un volume d'acide nitrique égal au volume de l'aréomètre depuis son extrémité inférieure jusqu'au trait d'affleurement, car l'instrument n'est en équilibre que lorsque la poussée qu'il subit est égale à son poids. Après avoir

[1] Fahrenheit, physicien, né à Dantzick en 1690, mort en 1740.

essuyé l'instrument, on le plonge dans l'eau et on le fait affleurer en ajoutant des poids dans le plateau, soient 3gr. Le poids de l'aréomètre est alors 200gr plus 3gr ou 203gr qui représentent le poids d'un volume d'eau égal à celui de tout à l'heure. En divisant 248 gr par 203gr, on aura la densité de l'acide nitrique qui est égale à 1,22.

92. **Aréomètres à poids constant et à volume variable.** — Les méthodes que nous venons d'indiquer exigent toujours au moins deux pesées, ce qui est un inconvénient pour les industriels qui veulent opérer rapidement. De plus, ils n'ont pas le plus souvent besoin de connaître exactement la densité des corps, mais désirent seulement apprécier le degré de concentration plus ou moins grande de certains liquides, alcools, acides, etc. Du reste, l'addition de l'eau dans ces liquides n'en faisant varier la densité que d'après une loi qui nous est inconnue, on a adopté pour chaque liquide un degré de concentration qui correspond à une densité déterminée, et à l'aide des aréomètres à poids constant et à volume variable, on reconnaît si le liquide a la densité voulue ou s'il s'en éloigne plus ou moins. Ces instruments sont des instruments de vérification et non de recherches scientifiques.

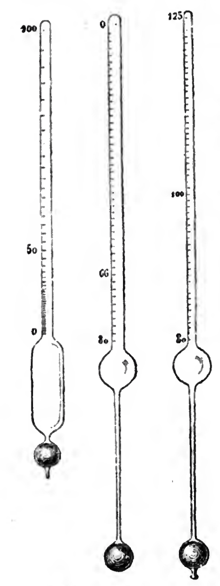


Fig. 70, 71, 72.

Leur principe est toujours celui des corps flottants. L'aréomètre s'enfoncera d'autant moins que le liquide sera plus dense, puisqu'il doit s'enfoncer jusqu'à ce qu'il ait déplacé un volume liquide dont le poids soit égal au sien. Ils se composent d'un tube cylindrique en verre soudé par sa partie inférieure à un autre cylindre de plus fort calibre ou à un renflement sphérique lesté par une boule contenant de la grenaille de plomb ou du mercure (fig. 70, 71, 72).

La graduation de ces instruments est différente, suivant qu'ils sont destinés à des liquides plus denses ou moins denses que l'eau.

Pour les liquides plus denses que l'eau (pèse-sirops, pèse-acides, pèse-sels), voici la méthode employée par Baumé : Il lestait l'instrument de telle sorte que dans l'eau pure il s'enfonçait presque jusqu'au haut de la tige. Au point d'affleurement, il marquait 0, puis préparait une dissolution de 85 parties d'eau et de 15 parties de sel marin. Il y plongeait l'appareil. La densité 1,115 de cette dissolution étant plus grande que celle de l'eau, l'aréomètre s'y enfonçait moins. Au nouveau trait d'affleurement, il marquait 15, divisait l'intervalle entre 0 et 15 en quinze parties égales et prolongeait les divisions. Pour que cette graduation se fasse plus facilement, on marque seulement sur le tube non encore fermé les deux points d'affleurement, on relève leur distance au compas et on la reporte sur une feuille de papier. On divise cette distance en quinze parties égales, on prolonge les divisions et on introduit ensuite la feuille dans le tube cylindrique, en ayant soin que les deux points 0 et 15 soient bien à la hauteur des deux traits tracés sur le tube. Après avoir fixé la feuille avec un peu de cire, on ferme le tube à la lampe d'émailleur. L'aréomètre de Baumé doit marquer 66° dans l'acide sulfurique concentré.

Pour les liquides moins denses que l'eau (pèse-esprits, pèse-liqueurs), l'appareil est lesté de manière que, dans une dissolution de 10 parties de sel et de 90 parties d'eau, il s'enfonce jusqu'au bas de la tige. On marque 0 au point d'affleurement. L'aréomètre est ensuite plongé dans l'eau pure, on marque 10 au nouveau trait d'affleurement, on divise l'intervalle en dix parties égales et on opère comme précédemment.

93. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — Pour mesurer le degré de concentration d'un alcool, la quantité d'eau qu'il contient, Gay-Lussac a construit l'alcoomètre centésimal (fig. 72). Nous extrayons de l'instruction qu'il a publiée sur cet instrument les lignes suivantes : « L'alcoomètre centésimal est, « quant à la forme, un aréomètre ordinaire. Il est gradué à la « température de 15°. Son échelle est divisée en cent parties ou « degrés dont chacun représente $\frac{1}{100}$ d'alcool en volume. La « division 0 correspond à l'eau pure, et la division 100 à l'alcool « absolu. Plongé dans les liquides spiritueux à 15°, il en fait « connaître immédiatement la force ou richesse en alcool. Par « exemple, si dans une eau-de-vie supposée à la température

« de 15°, il s'enfonce jusqu'à la division 50, il avertit par cela « même qu'elle contient $\frac{50}{100}$ de son volume en alcool pur. »

Pour graduer l'instrument, on le leste, de manière que, plongé dans l'eau pure, il affleure dans la partie inférieure de sa tige. On prépare une série de liquides en mettant dans des vases gradués 10, 20, 30, etc., volumes d'alcool, et complétant, dans chaque vase, le volume 100 avec de l'eau. On plonge l'aréomètre dans chacun de ces liquides, et on marque 10 au premier point d'affleurement, 20 au second, 30 au troisième, et ainsi de suite. Chaque intervalle est divisé en dix parties égales. Les degrés de l'aréomètre ne sont pas égaux dans toute la longueur de la tige. Quand on possède un bon alcoomètre gradué comme nous venons de l'indiquer, on construit les autres par comparaison.

94. **Densité des gaz.** — La densité des gaz se détermine par des méthodes que nous ne décrirons pas. Cette densité est ordinairement prise par rapport à celle de l'air considéré dans les mêmes conditions de température et de pression que les gaz.

95. **Applications des densités.** — Nous avons vu (83) que la densité d'un corps pouvait être regardée comme le rapport de son poids à son volume. De là résulte que le poids d'un corps est égal au produit du nombre qui représente son volume par celui qui représente sa densité.

On peut donc obtenir le poids d'un corps sans pesée directe, en multipliant sa densité par le nombre qui exprime son volume. Nous remarquerons que le poids est alors exprimé au moyen d'une unité correspondant à l'unité qui sert à évaluer le volume. Si le volume est évalué en centimètres cubes, le poids est évalué en grammes; si le volume est évalué en décimètres cubes, le poids est évalué en kilogrammes.

Quand il s'agit des gaz, comme leur densité est prise par rapport à l'air, il faut, pour avoir le poids d'un certain volume de gaz, multiplier ce volume exprimé en litres par la densité du gaz et multiplier le produit par $1^{gr},293$, poids d'un litre d'air dans les conditions de température et de pression où la densité a été déterminée.

**DENSITÉS DE QUELQUES CORPS SOLIDES A LA TEMPÉRATURE ZÉRO.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Platine laminé............. | 22,669 | Or fondu................ | 19,500 |
| Platine purifié..... ....... | 19,500 | Argent fondu........... | 10,500 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cuivre en fil | 8,87 | Cristal de roche | 2,653 |
| Laiton | 8,393 | Verre de Saint-Gobain | 2,483 |
| Acier | 7,8 | Bois de hêtre | 0,852 |
| Fer en barre | 7,8 | Frêne | 0,745 |
| Étain fondu | 7,291 | Orme | 0,800 |
| Zinc | 6,861 | Cèdre | 0,561 |
| Diamant | 3,531<br>3,501 | Peuplier ordinaire | 0,383 |
| | | Liège | 0,240 |
| Aluminium | 2,68 | Glace (eau glacée) | 0,930 |
| Marbre | 2,84 | | |

DENSITÉS DE QUELQUES CORPS LIQUIDES A ZÉRO.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eau distillée | 0,9998 | Essence de térébenthine | 0,869 |
| Eau de mer | 1,0268 | Esprit de bois | 0,820 |
| Acide sulfurique concentré | 1,843 | Sulfure de carbone | 1,293 |
| Alcool absolu | 0,815 | Mercure | 13,596 |
| Éther sulfurique | 0,715 | | |

# CHAPITRE V

## PESANTEUR DES GAZ. — PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. BAROMÈTRES.

96. **Transmission des pressions par les gaz.** — Nous avons vu (44 et 45) que les principes de l'égalité de pression et de la transmission des pressions dans tous les sens s'appliquaient aux gaz. L'expérience suivante peut servir à démontrer le second de ces principes.

Prenons un vase communiquant avec des tubes recourbés B, C, D (fig. 75) et avec un corps de pompe A muni d'un piston, versons dans les tubes un liquide qui sera au même niveau dans les deux branches, et enfonçons le piston en exerçant une pression sur sa tige; cette

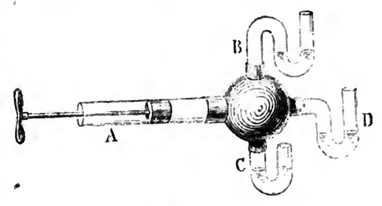


Fig. 73.

pression va se transmettre dans tous les sens et fera monter le liquide dans les tubes B, C, D, de la même quantité.

L'expérience suivante peut encore conduire aux mêmes conclusions et nous rappeler le principe de l'*égale* transmission des pressions dans tous les sens, principe que nous avons vérifié pour les liquides. Prenons un sac en caoutchouc (fig. 74), que nous

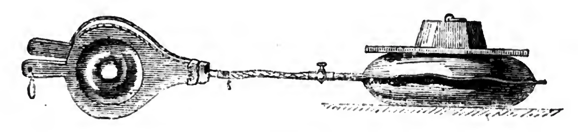


Fig. 74.

réunissons à un soufflet par un tube en caoutchouc; le sac, ne renfermant d'abord qu'une petite quantité d'air, est affaissé sur lui-même. Soufflons dedans, et nous le verrons se gonfler immédiatement en soulevant une planche et un poids de 10 kilogrammes placés sur lui. On voit qu'ici une pression relativement faible a été exercée sur une surface égale à la section du tube, et que cette pression se transmettant sur une surface beaucoup plus grande s'est trouvée multipliée et a pu soulever le poids.

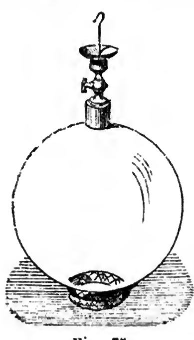


Fig. 75.

97. **Pesanteur des gaz.** — L'air et les gaz sont pesants. Cette propriété entrevue par Aristote fut démontrée par Galilée, qui pesa un ballon rempli d'air ordinaire et d'air comprimé, et trouva que dans le second cas le poids était plus grand que dans le premier. Plus tard Otto de Guéricke[1], après avoir inventé la machine pneumatique, donna à cette expérience la forme qu'on lui donne encore aujourd'hui dans les cours. Il fit le vide dans un ballon muni d'une douille à robinet (fig. 75) et le suspendit au-dessous de l'un des plateaux d'une balance, après avoir fermé le robinet. L'équilibre étant établi par des poids mis

1 Otto de Guéricke, physicien, né à Magdebourg en 1602, mort à Hambourg en 1686.

dans l'autre plateau, il ouvrit le robinet, et en même temps qu'il entendit le sifflement produit par la rentrée de l'air, il vit le fléau s'incliner du côté du ballon.

Il est évident que la même expérience pourrait être faite avec tout autre gaz que l'air.

## PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

« Avant, dit Biot [1], que la physique fût devenue une science « d'expérience, c'est-à-dire jusqu'au temps de Galilée, on s'ima- « ginait qu'aucune partie de l'espace ne pouvait être vide de ma- « tière, et l'on exprimait cette impossibilité en disant que la na- « ture a horreur du vide. Ainsi, lorsqu'on voyait l'eau monter « dans des pompes à l'instant où on élevait le piston, on disait « que le piston, en s'élevant, tendait à faire un vide dans les « tuyaux de la pompe, mais que la nature, qui avait horreur du « vide, s'empressait d'y faire monter l'eau pour le remplir. Per- « sonne ne s'avisait de demander comment la nature, qui n'est « que l'ensemble des phénomènes, pouvait ainsi se personnifier « et se transformer en un être susceptible de passions. A cette « époque le doute n'était pas inventé. Un jour, des fontainiers de « Florence ayant construit une pompe très-longue dans le dessein « d'élever de l'eau à une hauteur plus grande qu'ils n'avaient « coutume de le faire, trouvèrent qu'elle montait dans le corps « de pompe jusqu'à trente-deux pieds environ, mais qu'elle ne « *voulait* pas absolument monter plus haut, quoique l'on conti- « nuât de faire marcher le piston. Fort étonnés de cet accident, « ils allèrent consulter Galilée, qui leur dit, en se moquant « d'eux, qu'apparemment la nature n'avait horreur du vide que « jusqu'à la hauteur de trente-deux pieds. Déjà ce philosophe « avait entrevu que ce phénomène, et d'autres semblables, étaient « de simples résultats mécaniques produits par la pesanteur de « l'air; mais il n'avait probablement pas arrêté ses idées sur un « sujet si nouveau, et il aima mieux donner aux fontainiers cette « défaite que de hasarder son secret. Il mourut sans l'avoir fait « connaître, et ce fut Torricelli, son disciple, qui, en 1643, par

[1] Biot, *Traité de physique expérimentale*, p. 153. — Biot, physicien français, mort en 1862, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie française.

« une expérience extrêmement frappante et ingénieuse, mit « cette découverte dans tout son jour. »

98. **Expérience de Torricelli.** — Torricelli [1] fit le raisonnement suivant : Si la pesanteur de l'air est capable de faire monter l'eau dans les pompes jusqu'à trente-deux pieds ou 10$^m$,4, un liquide 13,5 fois plus dense que l'eau, comme le mercure, ne devra évidemment monter sous l'influence de l'air qu'à une hauteur 13,5 fois plus petite, c'est-à-dire à 0$^m$,76 environ. Pour vérifier cette induction, il fit l'expérience suivante, qui est devenue célèbre. Prenant un tube de 0$^m$,80 environ, fermé par un bout, il le remplit de mercure, puis le retourna en posant le doigt sur l'extrémité ouverte, afin d'empêcher le liquide de s'échapper. Il plongea alors cette extrémité dans une cuvette pleine de mercure, et, retirant le doigt, il cessa de soutenir la colonne de mercure contenue dans le tube. On vit aussitôt le liquide descendre et se fixer à une hauteur de 0$^m$,76 au-dessus du niveau du mercure dans la cuvette, laissant au-dessus de lui un espace AC (fig. 76) complétement vide, et que l'on appelle maintenant *chambre barométrique*.

Fig. 76.

99. L'expérience de Torricelli ne fut connue en France que quelques années plus tard. En 1646, Pascal [2] la répéta en variant sa forme de plusieurs manières. On cite surtout une expérience qu'il fit à Rouen. Ayant pris un tube de verre d'environ 15 mètres, il l'emplit de vin rouge et le retourna dans une cuvette qui en contenait aussi. Il vit la colonne liquide descendre et se soutenir à une hauteur d'environ 10 mètres.

Il fit encore exécuter par Périer, son beau-frère, sur le Puy-de-

1 Torricelli, physicien célèbre, né en 1608, à Faenza, mort en 1647.
2 Pascal (Blaise), célèbre écrivain et savant français, né à Clermont-Ferrand en 1623, mort en 1663.

Dôme, une expérience qui vint achever de prouver que l'ascension des liquides dans les tubes vides n'a d'autre cause que la pesanteur de l'air. Voici en quels termes il s'exprime dans la lettre où il indiquait l'expérience à faire :

« J'ai imaginé une expérience qui pourra lever tous « les doutes, si elle est exécutée avec justesse. Que l'on « fasse l'expérience du vide « plusieurs fois en un jour, « avec le même vif-argent « (*mercure*) au bas et au som- « met de la haute montagne « du Puy, qui est auprès de « notre ville de Clermont. Si, « comme je le pense, la hau- « teur du vif-argent est moin- « dre en haut qu'en bas, il s'en « suivra que la pesanteur et « la pression de l'air sont la « cause de cette suspension, « puisque bien certainement « il y a plus d'air qui pèse sur « le pied de la montagne que « sur son sommet, tandis « qu'on ne saurait dire que la « nature abhorre le vide en « un lieu plus qu'en l'autre. »

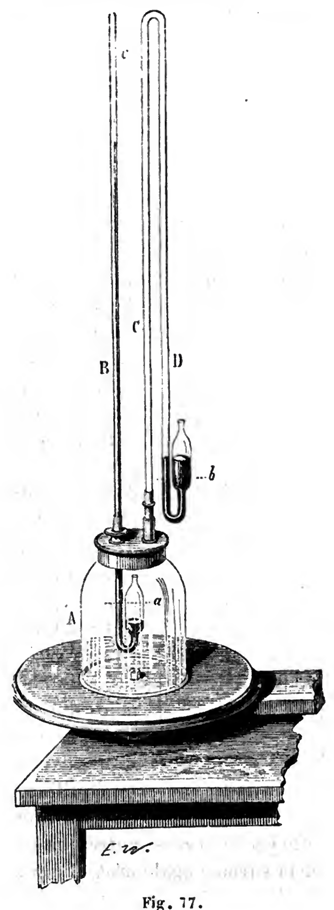


Fig. 77.

L'expérience fut faite le 19 septembre 1648. Tandis que des observateurs examinaient la colonne de mercure soulevée dans un tube placé au pied de la montagne, Périer gravissait celle-ci en tenant un tube pareil au premier, et constatait qu'à mesure qu'il s'élevait, le mercure s'abaissait dans le tube qu'il portait.

100. Cette expérience peut être faite dans les cours en lui donnant une autre forme. Un tube de Torricelli B (fig. 77) est placé dans une cloche de verre, de manière que l'air intérieur de la cloche exerce seul sa pression sur le mercure de la fiole *a* qui termine le tube et qui lui sert de cuvette. Un autre tube CD deux fois recourbé et se terminant aussi par un évasement *b* est fixé sur la partie supérieure de la cloche, de telle sorte que le mercure de ce tube étant également pressé par l'air intérieur de la cloche et par l'air extérieur se tienne au même niveau dans la branche D et dans l'évasement *b*. On place cet appareil sur la platine de la machine pneumatique, et on fait le vide. Dès que l'air de la cloche commence à se raréfier, la pression qu'il exerce sur le mercure du tube B diminuant, le mercure descend dans ce tube pour se rendre dans la fiole *a*, tandis qu'au contraire le mercure de *b*, poussé par l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure, s'élève dans le tube D.

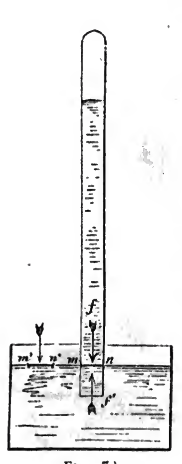


Fig. 78.

101. Après avoir constaté que c'est bien la pesanteur de l'air qui fait monter le mercure dans les tubes vides, cherchons à nous expliquer cet effet et à interpréter l'expérience de Torricelli. Pour cela considérons à la surface du mercure de la cuvette deux surfaces planes égales (fig. 78), l'une *mn* dans l'intérieur du tube et représentant sa section, l'autre *m'n'* extérieure ; la tranche *mn* supporte de haut en bas une pression *f* égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base *mn*, et pour hauteur la hauteur du liquide dans le tube. Donc, pour que *mn* soit en équilibre, il faut qu'elle supporte de bas en haut une pression *f* justement égale à *f'*. Cette pression n'est autre que celle de l'atmosphère qui s'exerce sur la surface égale *m'n'*, et qui se transmet par le mercure d'après le principe de la transmission des pressions.

Nous ferons observer que, quel que soit le diamètre du tube, la hauteur de la colonne mercurielle soulevée sera la même. Supposons en effet *mn* double de ce que nous l'avons supposée, la pression transmise de bas en haut sera double ; elle viendra de

deux surfaces égales à $m'n'$, et, par suite, soutiendra une colonne de même hauteur, mais de section double.

La colonne de mercure peut donc servir de mesure à la pression de l'atmosphère. Les instruments à l'aide desquels on l'apprécie sont appelés *baromètres* : nous les décrirons après avoir signalé un certain nombre d'applications des principes qui précèdent.

102. **Effets de la pression atmosphérique.** — La pression atmosphérique étant en général de 0,76, on prouvera facilement que la pression qui s'exerce sur 1 centimètre carré est de $1^k$,0337; sur 1 décimètre carré, elle sera de $103^k$,36, et sur 1 mètre carré de 10 336 kilogrammes. Or, la surface du corps d'un homme de taille moyenne surpassant 1 mètre carré 1/2, la somme des pressions exercées par l'atmosphère sur cet homme est de plus de 15 000 kilogrammes.

« On trouvera peut être, dit Biot [1], ce résultat bien incroyable, « et l'on pensera qu'une pression si considérable devrait gêner « beaucoup, ou même empêcher tout à fait nos mouvements; « mais en général, dans les sciences, il faut raisonner avant de « juger et ne point se hâter de rejeter un résultat comme absurde « uniquement parce qu'il nous étonne. Voici un autre exemple « bien plus fort. Il y a dans la mer des poissons qui vivent habi- « tuellement à de très-grandes profondeurs. Les pêcheurs en « prennent quelquefois à deux ou trois mille pieds au-dessous de « la surface de l'eau. Ces poissons se trouvent donc chargés pen- « dant toute leur vie du poids d'une colonne d'eau de deux ou « trois mille pieds, c'est-à-dire soixante dix-huit ou quatre-vingts « fois plus lourde que le poids de l'atmosphère; cependant ils ne « sont point écrasés par cet énorme poids. Non-seulement ils « vivent, mais ils se meuvent en tous les sens avec la plus grande « agilité. Cela est encore bien plus extraordinaire que de nous « voir supporter si aisément la pression de l'air. Mais tout le mer- « veilleux disparaît, si l'on fait attention que les poissons dont « nous venons de parler sont intérieurement remplis et pénétrés « de liquides qui résistent à la pression de l'eau extérieure en « vertu de leur impénétrabilité; de sorte que les membranes de

[1] Biot, *Physique expérimentale*, p. 157, t. I.

« l'animal n'en sont pas plus altérées que ne le serait la pellicule « la plus mince, que l'on descendrait à une pareille profondeur. « Quant à la facilité des mouvements, elle tient à ce que le corps « du poisson est également pressé par-dessus et par-dessous, à « droite et à gauche, de sorte que la pression se contre-balance « d'elle-même ; et ainsi il lui est aussi aisé de se déplacer que « s'il nageait à la surface même de l'eau. Semblablement, pour « nous qui supportons le poids de l'atmosphère, l'intérieur de « notre corps et nos os mêmes sont remplis, ou de liquides in-« compressibles capables de supporter toutes les pressions, ou « d'air aussi élastique que l'air du dehors, et qui contre-balance « son poids. Voilà pourquoi nous n'en sommes pas incommodés, « et nous n'éprouvons non plus aucune difficulté à nous mou-« voir, parce que la pression de l'air se contre-balance de toutes « parts sur les diverses parties de notre corps, comme celle de « l'eau sur le corps des poissons. Nous ne pourrions être écrasés « par l'air extérieur que si on détruisait en nous l'air intérieur « qui lui fait équilibre, et, au contraire, nous souffririons beau-« coup si l'on nous déchargeait tout à coup de cette pression en « nous plaçant dans le vide ; car alors l'air intérieur n'ayant plus « rien qui lui résistât se dilaterait, nous gonflerait et nous ferait « périr infailliblement. Cela arrive à un grand nombre de pois-« sons quand on les retire du fond des abîmes de la mer, et même « seulement d'une profondeur de 20 ou 30 mètres. La plupart « d'entre eux ont, dans l'intérieur de leur corps, une vessie rem-« plie d'air. Tant que ces animaux restent à la profondeur où ils « vivent d'ordinaire, l'air contenu dans leur vessie a le degré de « compression et d'élasticité nécessaire pour supporter le poids « de l'eau qui pèse sur eux ; mais si tout à coup on les retire hors « de l'eau, comme ils n'ont pas tous des conduits assez larges « pour chasser promptement le superflu de cet air, et comme « quelques-uns même n'en ont pas du tout, il arrive que leur « vessie se gonfle, se crève, et l'air qu'elle contenait occupant « un volume quatre-vingts ou cent fois plus considérable, rem-« plit leur corps, renverse leur estomac en dehors, le force même « à sortir par la gueule et les fait périr. Alors on peut les lais-« ser sur l'eau, ils ne vont pas au fond, leur corps flotte sur la « surface, soutenu par cet estomac rempli d'air, comme par un « ballon. »

Dans les cours on fait ordinairement les expériences suivantes pour démontrer les effets de la pression atmosphérique.

103. **Crève-vessie.** — On prend un cylindre de verre A (fig. 79) ouvert à ses deux extrémités. On applique sur la base supérieure une peau de vessie ou une membrane de baudruche, et après l'avoir mouillée, on la fixe avec une ficelle très-serrée sur les bords du cylindre : elle achève de se tendre en séchant. On fixe ensuite l'appareil par sa base inférieure sur la machine pneumatique. Dès que la machine est mise en mouvement, l'air intérieur se trouvant raréfié ne fait plus équilibre à la pression de l'atmosphère qui, pesant sur la membrane, la déprime et la crève. L'air rentrant brusquement dans le cylindre vide produit une détonation.

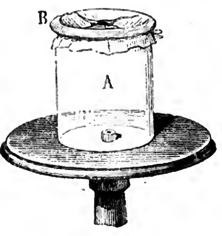


Fig. 79.

104. **Coupe-pommes.** — On prend un vase en verre (fig. 80), ouvert aussi par les deux bouts et portant à sa partie supérieure

Fig. 80.

une garniture métallique terminée par un bord aigu qui sert de couteau circulaire. On fixe l'appareil par sa base inférieure sur le plateau de la machine pneumatique, et on pose une pomme sur la base supérieure. Dès que l'air est raréfié par le jeu de la machine, la pression atmosphérique appuyant sur la pomme, sans être contre-balancée par la force élastique de l'air intérieur, fait pénétrer le couteau à travers la pomme, qui se trouve bientôt précipitée avec détonation dans l'intérieur de l'appareil, en lais-

sant autour de la garniture métallique un morceau annulaire découpé par le couteau.

105. **Récipient à main.** — On place sur la machine pneumatique un cylindre de verre ouvert à ses deux extrémités (fig. 81), on met la main à plat sur sa base supérieure, et dès que la machine pneumatique fonctionne, la pression atmosphérique appuie la main sur l'appareil assez fortement pour qu'on ne puisse la retirer qu'à condition de laisser rentrer l'air dans le récipient. En même temps, la partie charnue de la paume de la main entre dans le récipient et le sang se trouve fortement attiré dans cette région. C'est là du reste le mécanisme des ventouses employées en médecine.

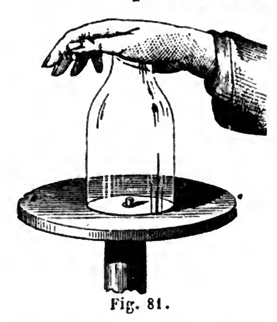
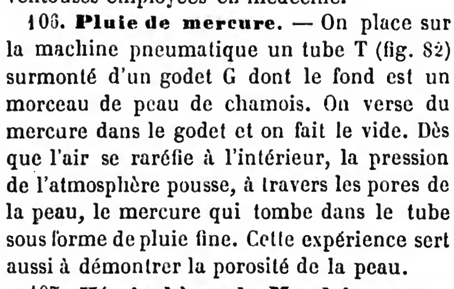


Fig. 81.



106. **Pluie de mercure.** — On place sur la machine pneumatique un tube T (fig. 82) surmonté d'un godet G dont le fond est un morceau de peau de chamois. On verse du mercure dans le godet et on fait le vide. Dès que l'air se raréfie à l'intérieur, la pression de l'atmosphère pousse, à travers les pores de la peau, le mercure qui tombe dans le tube sous forme de pluie fine. Cette expérience sert aussi à démontrer la porosité de la peau.

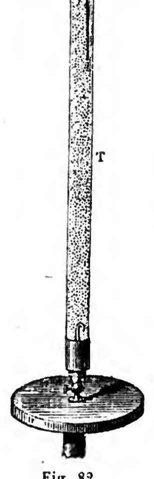
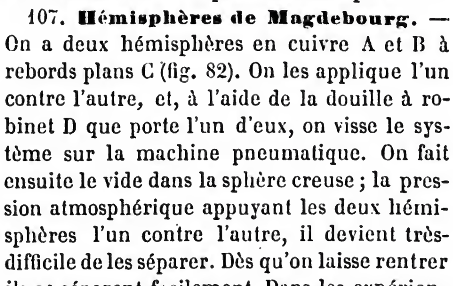



Fig. 82.



107. **Hémisphères de Magdebourg.** — On a deux hémisphères en cuivre A et B à rebords plans C (fig. 82). On les applique l'un contre l'autre, et, à l'aide de la douille à robinet D que porte l'un d'eux, on visse le système sur la machine pneumatique. On fait ensuite le vide dans la sphère creuse ; la pression atmosphérique appuyant les deux hémisphères l'un contre l'autre, il devient très-difficile de les séparer. Dès qu'on laisse rentrer l'air à l'intérieur, ils se séparent facilement. Dans les expérien-

ces de Magdebourg, vingt chevaux furent impuissants à effectuer la séparation.

108. Enfin nous citerons encore l'expérience suivante comme effet de la pression atmosphérique.

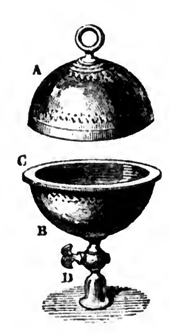


Fig. 83.

Fig. 84.

Une carafe est remplie d'eau à pleins bords, on applique avec précaution une feuille de papier sur la surface du liquide, et on peut alors retourner la carafe sans que le liquide s'en échappe, la pression atmosphérique le maintenant dans le vase (fig. 83). La feuille de papier est destinée à empêcher l'air de monter à travers l'eau en vertu de sa densité plus faible.

## BAROMÈTRES.

109. **Baromètres.** — Nous avons dit plus haut qu'on appelait *baromètres* les instruments destinés à mesurer la pression atmosphérique. On leur a donné diverses formes que nous allons successivement étudier.

110. **Baromètre à cuvette.** — Le baromètre à cuvette ordinaire et le plus simple de tous, c'est celui qu'employaient Torricelli et Pascal.

Mais si on le construisait comme nous l'avons dit en décrivant les expériences de Torricelli, ce ne serait qu'un instrument fort imparfait. Car le mercure exposé à l'air absorbe une certaine quantité de cet air, qui y reste engagé tant par l'attraction du

liquide que par la pression de l'atmosphère. Cet air soulagé de la pression atmosphérique, dès qu'il est placé dans le vide barométrique, se dégage en bulles qui se rendent dans la partie supérieure du tube, exercent leur pression sur le mercure, et, contrebalançant en partie la pression exercée par l'air du dehors, oblige la colonne liquide à descendre plus bas qu'elle ne descendrait si la chambre barométrique était parfaitement vide; de sorte que la hauteur observée ne représente pas la véritable pression de l'atmosphère, mais seulement l'excès de la pression du dehors sur celle du dedans.

De plus, l'expérience prouve que les molécules de l'eau et de l'air adhèrent très-fortement à la surface du verre, et, comme il y a toujours de l'eau en vapeur répandue dans l'atmosphère, il arrive qu'une couche d'eau et d'air adhère aux parois intérieures du tube : cet air et cette vapeur d'eau montant dans la chambre barométrique viennent, lorsque le tube est renversé, ajouter leur action à celle de l'air qui s'est dégagé du mercure.

Pour éviter ce double inconvénient, on opère comme nous allons l'indiquer. On choisit un tube de 80 à 85 centimètres de longueur; on le ferme à son extrémité T (fig. 85), et on soude

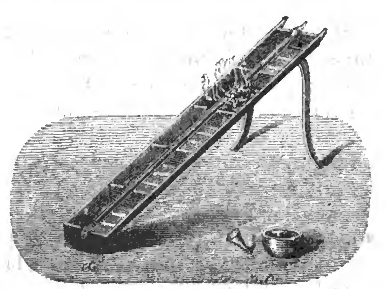


Fig. 85.

à son autre extrémité une boule T'. On emplit ce tube de mercure bien pur, on le couche sur une grille de tôle inclinée et on chauffe successivement toutes les parties du tube en commençant par l'extrémité T'. La chaleur fait dégager les bulles d'air et de vapeur qui étaient adhérentes aux parois intérieures du tube. Quant à l'air que contenait le mercure, il se dégage aussi

pendant l'ébullition de ce dernier. La boule T' sert à empêcher que le mercure, pendant son ébullition, ne soit projeté au dehors. On retire ensuite les charbons, on laisse refroidir, et après avoir détaché la boule B, on achève de remplir avec du mercure récemment bouilli, puis on retourne le tube dans la cuvette, comme le faisait Torricelli.

Lorsque l'opération a été bien faite, si l'on incline un peu rapidement le tube de manière que le mercure l'emplisse tout à fait, le liquide produit en frappant le verre un bruit sec et métallique.

Le tube et la cuvette sont fixés contre une planchette en bois sur laquelle est tracée une graduation en centimètres et millimètres dont le zéro correspond au niveau du mercure dans la cuvette.

Mais, quelque soin que l'on ait donné à sa construction, le baromètre à cuvette ordinaire présente deux inconvénients très-graves :

1° Le niveau du mercure ne peut varier dans le tube sans varier en sens inverse dans la cuvette ; il cesse alors de correspondre au zéro de la graduation, et les indications de l'instrument ne sont plus exactes. Pour diminuer autant que possible ce premier inconvénient, on donne à la cuvette un large diamètre (fig. 86) de telle sorte que pour une variation sensible de niveau dans le tube, le niveau dans la cuvette ne change pas sensiblement.

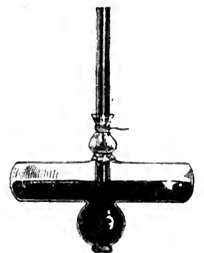


Fig. 86.

2° Cet instrument n'est pas facilement transportable.

111. **Baromètre de Fortin.** — Fortin a adopté dès le commencement du siècle une disposition qui échappe au double reproche que nous venons de formuler.

La cuvette de son baromètre est cylindrique ; elle a pour fond une peau de daim contre la face inférieure de laquelle vient appuyer une vis V (fig. 87). Cette vis permet de relever ou d'abaisser à volonté le fond de la cuvette, de manière que, lorsqu'on veut faire une observation, on puisse toujours amener la surface du mercure en contact avec la pointe d'une petite flèche en ivoire *o*; à cette pointe correspond le zéro de la graduation. La

partie supérieure de la cuvette est fermée par un couvercle percé de petites ouvertures disposées de manière qu'à travers elles l'air extérieur puisse pénétrer pour exercer sa pression, sans que le

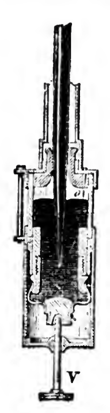



Fig. 87.

mercure s'échappe. Le tube est effilé par le bas. Dans toute sa longueur il est entouré d'un étui métallique (fig. 88) percé de deux fentes longitudinales parallèles, à travers lesquelles on peut voir le mercure. La graduation est tracée sur le bord de l'une d'elles. Le baromètre tout entier peut être enfermé dans un trépied dont les branches se rapprochent et forment un étui creux. Une suspension dite à la Cardan, dont

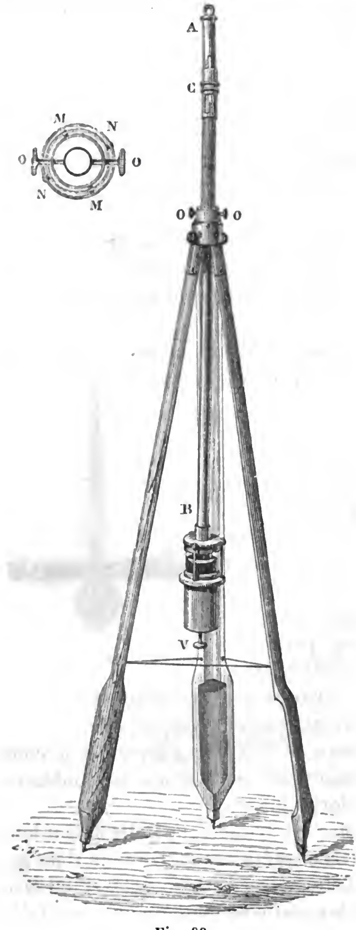



Fig. 88.

on voit le détail sur le côté de la figure, lui permet de prendre de lui-même une position rigoureusement verticale. Quand l'instrument doit être transporté, on soulève la vis V de manière à remplir de mercure la cuvette et le tube. Le baromètre peut alors être renversé sans que le liquide produise de choc capable de le briser et sans que rien s'en échappe ou s'y introduise.

112. **Baromètre à siphon.** — Le baromètre à siphon se compose d'un tube recourbé à branches inégales (fig. 89). On remplit la grande branche de mercure en prenant les précautions que nous avons indiquées (110). On retourne alors l'appareil sans laisser rentrer d'air; le mercure baisse dans la grande branche qui doit avoir plus de 80 centimètres, et la différence des niveaux du mercure dans les deux branches mesure la pression atmosphérique. Comme le niveau ne peut varier dans l'une des branches sans varier d'une quantité égale dans l'autre, on fait une double graduation en millimètres le long du grand tube, à partir du point *o* que l'on prend pour zéro. La distance verticale des niveaux A et B se compose évidemment de A*o* plus *o*B; on évalue la distance A*o* en lisant sur la graduation qui va de bas en haut, et la distance *o*B en lisant sur la graduation qui va de haut en bas. La somme des deux lectures donne la pression atmosphérique.

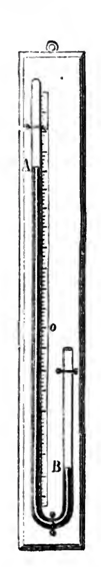


Fig. 89.

113. **Baromètre de Gay-Lussac.** — Le baromètre que nous venons de décrire ne peut être facilement transporté sans qu'on ait à craindre que l'air rentre dans la chambre barométrique et que le mercure s'échappe par l'extrémité ouverte de la petite branche. Gay-Lussac y a apporté une modification qui le rend portatif. Les deux branches de même diamètre sont réunies par un tube très-fin dit *capillaire*. Toutes deux sont fermées à leur partie supérieure, et la petite branche est munie d'une ouverture O″ (fig. 90), qui permet à la pression de l'air de s'exercer, mais qui, vu sa petitesse, ne permettrait pas au mercure de s'échapper. Quand on veut transporter l'appareil, on le renverse de manière à emplir la grande branche, comme l'indique la figure 91, et on le place dans un étui fait exprès.

Lorsqu'on met l'appareil dans la position de la figure 90, qui convient aux observations, le tube capillaire qui réunit les deux branches empêche l'air de diviser la colonne liquide et de s'introduire dans la chambre barométrique. Pour éviter plus sûrement cette rentrée de l'air, M. Bunsen a placé sur le trajet du tube capillaire une ampoule oblongue CD (fig. 92), dans laquelle vient plonger l'extrémité effilée de E. Si une bulle d'air s'engageait par hasard en BC, elle monterait le long de la paroi et viendrait se loger en D, où sa présence n'aurait aucun inconvénient.

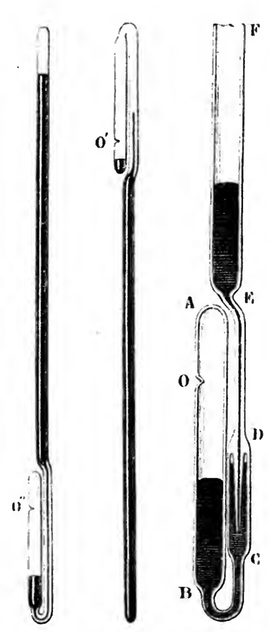


Fig. 90. Fig. 91. Fig. 92.

**114. Baromètre à cadran.** — Le baromètre à cadran n'est autre qu'un baromètre à siphon dont les indications sont rendues plus sensibles par le mouvement d'une aiguille sur un cadran divisé. Sur le mercure de la petite branche flotte une petite masse de fer A (fig. 93), attachée à un fil qui passe sur une poulie P et soutient à son autre extrémité un contre-poids B. Au centre de la poulie se trouve une aiguille qui tourne avec elle sur un cadran derrière lequel le baromètre est dissimulé. Quand le mercure monte dans la grande branche par suite d'une augmentation de la pression atmosphérique, il descend dans la petite branche, et le flotteur A le suivant fait tourner l'aiguille dans le sens des aiguilles d'une montre. Quand, au contraire, la pression atmosphérique diminue, le mercure descend dans la grande branche, monte dans la petite; le flotteur aidé par le contre-poids B remonte et fait tourner la poulie et l'aiguille dans le sens contraire. Cet instrument est fort imparfait, et il ne faut guère compter sur ses indications.

115. **Baromètre métallique de M. Bourdon.** — On emploie aussi, depuis quelques années, un baromètre construit d'après des principes tout différents de ceux que nous venons d'exposer. L'invention en est due à M. Bourdon, *amb* est un tube

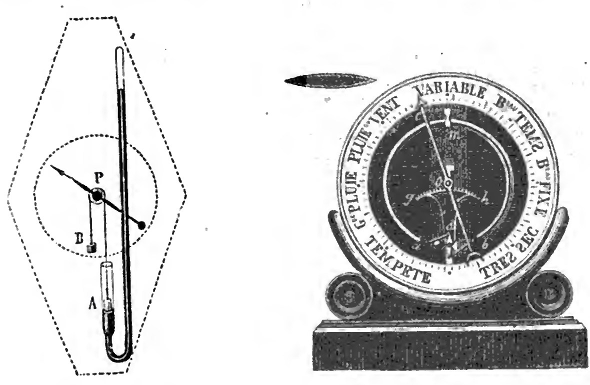



Fig. 93. Fig. 94.

courbe métallique et vide d'air (fig. 94); ses parois sont minces et élastiques : on en a représenté la section à côté de la figure. En son milieu *m* ce tube est fixé à la boîte de l'instrument ; ses extrémités *a*, *b* sont reliées par de petites tiges articulées à un levier *d* mobile autour d'un axe passant par son milieu. Cet axe en tournant entraîne dans son mouvement un secteur denté *gh*, qui engrène avec un pignon *o* au centre duquel se trouve fixée une aiguille mobile sur un cadran. Quand la pression atmosphérique diminue, le tube se gonfle par l'élasticité de ses parois, ses extrémités *a*, *b* s'éloignent et font tourner l'aiguille dans un sens ; si la pression augmente, le tube s'aplatit, ses extrémités se rapprochent et l'aiguille tourne en sens contraire. Ce baromètre, que l'on gradue par comparaison, est sujet à se déranger. Quand il est dérangé, on peut le régler à nouveau à l'aide d'une clef située dans l'appareil.

116. **Baromètre anéroïde de Vidi.** — Le baromètre anéroïde de Vidi est construit d'après le même principe : au lieu d'un tube vide, il renferme une boîte cannelée vide, dont les parois

s'éloignent ou se rapprochent, suivant que la pression augmente ou diminue. Ces mouvements se transmettent à une aiguille par un mécanisme que nous ne décrirons pas.

117. **Usages du baromètre.** — Le baromètre ne sert pas seulement au physicien et au chimiste pour mesurer la pression atmosphérique ; on le consulte aussi souvent pour préjuger du temps qu'il fera. Les baromètres d'appartement portent sur leur échelle les indications : *très-sec*, *beau fixe*, *beau*, *variable*, *pluie ou vent*, *tempête*. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet dans un chapitre consacré à la météorologie, et nous discuterons le degré de confiance qu'il faut accorder à ces indications.

---

# CHAPITRE VI

## COMPRESSIBILITÉ DES GAZ. — LOI DE MARIOTTE. MANOMÈTRES.

118. L'expérience du briquet à air, que nous avons décrite (7) nous a montré que les gaz étaient très-compressibles. La résistance que l'on éprouve dans cette expérience pour enfoncer le piston montre de plus qu'à mesure que le volume d'un gaz diminue sa force élastique augmente. La propriété inverse appartient aussi aux gaz, c'est-à-dire que leur force élastique diminue quand on leur offre un plus grand espace à occuper.

Mariotte[1] a trouvé la relation qui existe entre la force élastique des gaz et leur volume. Les expériences qu'il exécuta en 1670 le conduisirent à poser la loi suivante.

119. **Loi de Mariotte.** — *Les volumes d'une masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte, pourvu que sa température reste constante.*

Cela signifie que si l'on prend la masse gazeuse avec un vo-

[1] Mariotte, physicien distingué, né en Bourgogne vers 1620, mort en 1684, membre de l'Académie des sciences.

lume donné sous une pression déterminée, son volume deviendra deux, trois, quatre, cinq fois plus petit quand on la soumettra à une pression deux, trois, quatre, cinq fois plus grande, ou inversement deux, trois, quatre, cinq fois plus grand sous une pression deux, trois, quatre, cinq fois plus petite.

Voici comment Mariotte démontrait cette loi pour des pressions qui ne s'écartaient pas beaucoup de la pression atmosphérique.

Pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, il prenait un tube à branches inégales ABC (fig. 95), fixé contre une planchette. La petite branche était fermée, la grande ouverte. Il versait d'abord par l'entonnoir C du mercure, de manière qu'il se mît de niveau dans les deux branches, suivant la ligne *oo*, et enfermât dans la petite branche une masse d'air qui, vu l'égalité des niveaux, se trouvait évidemment à la pression atmosphérique extérieure. Il versait ensuite du mercure dans la grande branche, jusqu'à ce que le liquide montant dans la petite réduisît le volume du gaz à moitié. A cet instant, il est évident que la force élastique de ce gaz fait équilibre à la colonne de mercure qui s'élève dans le grand tube du niveau D au niveau E, augmentée de la pression atmosphérique qui s'exerce librement en E. Or Mariotte constatait que la colonne DE était égale à celle qui était soulevée dans un baromètre voisin au moment de l'expérience. La force élastique du gaz faisait donc équilibre à deux pressions atmosphériques, ce qui montre que, le volume de la masse gazeuse étant réduit à moitié, sa force élastique a doublé.

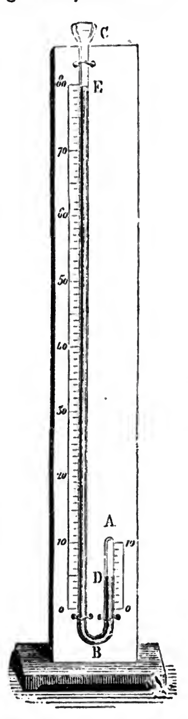


Fig. 95.

Si on avait réduit le volume au tiers du volume primitif, la colonne soulevée dans le grand tube au-dessus du nouveau niveau serait égale à deux fois la colonne mercurielle soulevée dans le baromètre, et, en y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce

toujours au sommet du liquide, on verrait que la force élastique du gaz est devenue triple de ce qu'elle était.

120. Pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique, voici la méthode qu'employait Mariotte : On prend un tube de $1^m,50$ de longueur environ, aussi cylindrique que possible, fermé à l'une de ses extrémités et divisé en parties d'égale capacité. On verse du mercure dans ce tube en laissant une certaine quantité d'air, puis on le renverse dans une cuvette profonde pleine de mercure (fig. 96), comme le faisait Torricelli et on enfonce le tube dans la cuvette jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même dans le tube et dans la cuvette. L'air enfermé se trouve alors à la pression atmosphérique. On soulève le tube de manière

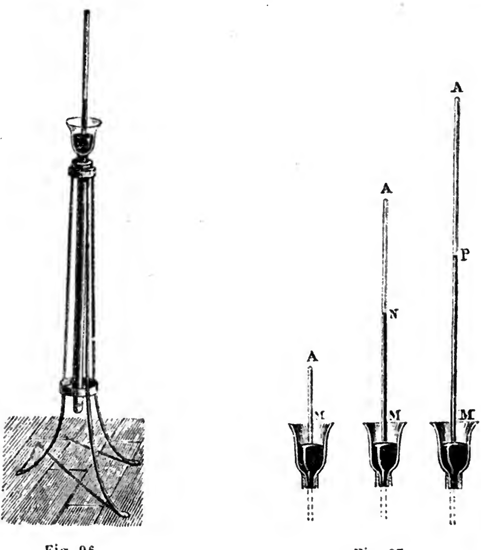



Fig. 96. Fig. 97.

à augmenter le volume réservé au gaz ; mais la force élastique de celui-ci diminuant, le mercure poussé par la pression atmosphérique monte dans le tube. Lorsque le volume AP (fig. 97) est double de ce qu'il était d'abord, la colonne soulevée PM est égale à la

moitié de celle qui est soulevée dans un baromètre voisin. Or, en cet instant de l'expérience, la pression atmosphérique qui s'exerce sur le niveau de la cuvette est contre-balancée par la force élastique du gaz et par la colonne soulevée. Celle-ci étant moitié de la pression de l'atmosphère, la force élastique du gaz doit aussi en être la moitié. Donc, le volume doublant, la pression est devenue moitié de ce qu'elle était.

Si l'on soulève le tube de manière que le volume AN réservé au gaz soit les deux tiers de ce qu'il était au début de l'expérience, la colonne soulevée NM devient le tiers de la pression atmosphérique; donc la force élastique de l'air en est les deux tiers, et par suite la loi est encore vérifiée.

MM. Despretz et Regnault, par des expériences faites sur la compressibilité des gaz, ont prouvé que tous ne suivent pas exactement la loi de Mariotte; mais les écarts qu'ils ont constatés ne se produisant que dans des circonstances exceptionnelles, la loi de Mariotte, *en pratique*, peut être considérée comme exacte.

121. **Variation de la densité d'un gaz avec la pression qu'il supporte.** — Il est évident que lorsqu'on réduit le volume d'un gaz à la moitié de ce qu'il était, il devient deux fois plus dense, puisque deux fois plus de molécules sont emprisonnées dans le même volume, et, comme alors la force élastique du gaz est devenue double, on voit qu'à la même température, *la densité d'un gaz est proportionnelle à sa force élastique.*

## MANOMÈTRES.

122. **Manomètres.** — On appelle manomètres des appareils destinés à mesurer la force élastique des gaz et des vapeurs. Ces appareils rendent chaque jour les plus grands services dans l'industrie. Pour la marche régulière d'une machine à vapeur et pour éviter les explosions qu'amènerait un excès de force élastique de la vapeur dans les chaudières, il est indispensable que le chauffeur connaisse à chaque instant cette force élastique. Aussi les règlements exigent-ils que les chaudières soient munies de manomètres.

On a adopté pour ces instruments différentes dispositions que nous allons décrire.

123. **Manomètre à air libre.** — Le manomètre à air libre

consiste en un tube de verre TT′ (fig. 98) plongeant dans une cuvette à mercure V. Cette cuvette est placée dans une enveloppe métallique C, qui peut être mise en communication par un tube à robinet avec la chaudière à vapeur ou avec l'enceinte renfermant le gaz dont on veut mesurer la force élastique. Le tube en verre est mastiqué en E dans l'ouverture supérieure de l'enveloppe métallique. On comprend que la vapeur arrivant par le robinet se répande autour de la cuvette et exerce sa pression sur le niveau du mercure. Celui-ci monte alors dans le tube à une hauteur d'autant plus grande que cette pression est plus considérable. Si le mercure s'élève à une hauteur de $0^m,76$, cela veut dire que la vapeur a une force élastique capable de faire équilibre à la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur le mercure du tube, augmentée de $0^m,76$ de mercure soulevé, et comme la pression de l'atmosphère est regardée comme égale en moyenne à $0^m,76$ de mercure, on dit que la tension de la vapeur est de deux fois $0^m,76$ ou de deux atmosphères. Si le mercure s'élève à deux fois $0^m,76$, cela veut dire que la vapeur a une force élastique de trois atmosphères, et ainsi de suite. Une graduation faite sur une planche contre laquelle est fixé le tube permet de mesurer la hauteur de la colonne mercurielle soulevée.

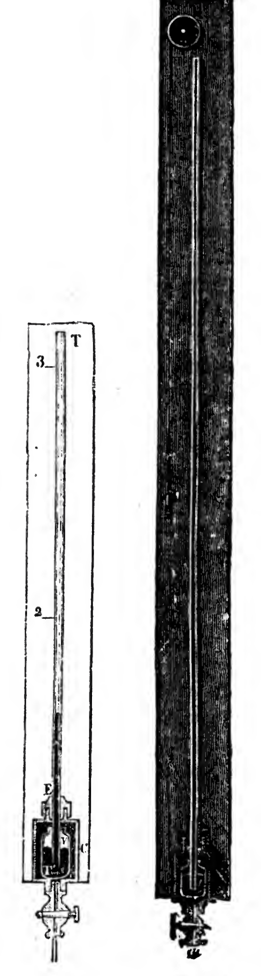



Fig. 98. Fig. 99.

Ces appareils n'étant pas destinés à des mesures d'une précision par-

faite, on ne tient pas compte de la variation du niveau dans la cuvette.

124. Si la pression devait aller jusqu'à quatre, cinq atmosphères et plus, on serait obligé d'employer des tubes de verre trop longs et, par suite, d'une grande fragilité. De plus, le haut de la colonne mercurielle serait difficile à observer. Pour éviter ce double inconvénient, on emploie des tubes de fer (fig. 99). A la surface du mercure, dans le tube, se trouve un flotteur en fer *d* auquel est attachée une corde s'enroulant sur une poulie et tendue constamment par un contre-poids *e'*. Lorsque le mercure s'élève, le flotteur s'élève avec lui, et le contre-poids *e'* descend; lorsque le mercure baisse, le contre-poids monte. La position du contre-poids le long d'une échelle graduée fixée à l'instrument indique la force élastique de la vapeur.

125. **Manomètres à air comprimé.** — Pour éviter de donner aux manomètres de trop grandes dimensions, ce qui ne serait pas possible du reste sur les machines mobiles, comme les locomotives, on emploie, pour faire équilibre à la pression de la vapeur, non-seulement l'ascension d'une colonne de mercure, mais en même temps la force élastique d'une masse d'air renfermée dans un espace limité. Cette force élastique augmente à mesure que le mercure montant réduit le volume du gaz. C'est là le principe des manomètres à air comprimé.

Concevons (fig. 100) un tube recourbé ABC, fermé en A, contenant à sa partie inférieure du mercure, et au-dessus de ce

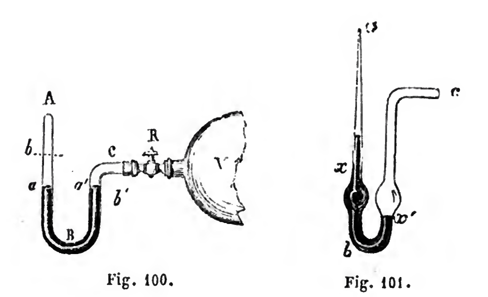



Fig. 100. Fig. 101.

liquide en A*a* de l'air sec à la pression atmosphérique. Si le tube est en communication avec un réservoir V renfermant des gaz ou

de la vapeur à la pression atmosphérique, le niveau du mercure sera le même dans les deux branches, comme l'indique la figure. Mais dès que la pression augmentera dans l'espace V, le mercure montera, en *b*, par exemple.

Souvent on donne à ces appareils la forme indiquée par la figure 101.

La graduation se fait ordinairement par comparaison avec un manomètre à air libre. Pour cela on fixe en *l* (fig. 102) le mano-

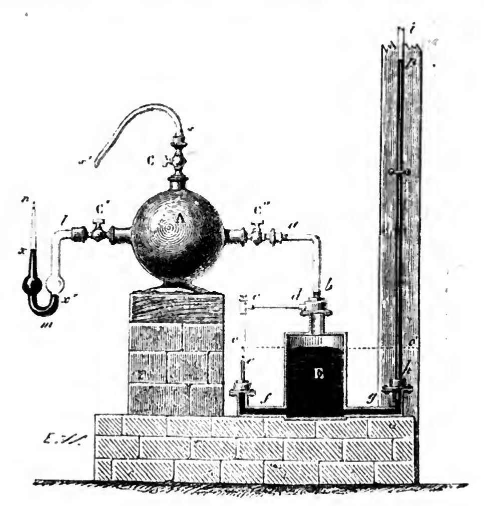


Fig. 102.

mètre à air comprimé sur un réservoir A qui se trouve en communication avec un cylindre E renfermant du mercure. Sur ce cylindre viennent aboutir, en *f* un tube *cef* qui servira à indiquer le niveau du liquide, en *g* un tube *ghi* qui servira de manomètre à air libre. On comprime de l'air en A : sa pression fait monter le mercure du manomètre à graduer en *x* et celui du manomètre à air libre en *p*. Il est évident que, pour savoir la pression qu'il faudra marquer au niveau *x*, il suffit d'ajouter la pression atmosphérique à la colonne *o'p*. On répète l'expérience pour des pressions différentes, et le manomètre se trouve gradué.

126. **Manomètres métalliques.** — Dans un très-grand nombre d'usines on fait usage de manomètres bien différents des précédents. Ce sont les manomètres métalliques de M. Bourdon.

Ils se composent d'un tube métallique A (fig. 103), contourné en spirale, dont l'extrémité B fermée est reliée par un levier BCD, à bras inégaux, à une aiguille DE. L'extrémité ouverte du tube peut être mise en communication par le robinet R avec la chaudière à vapeur.

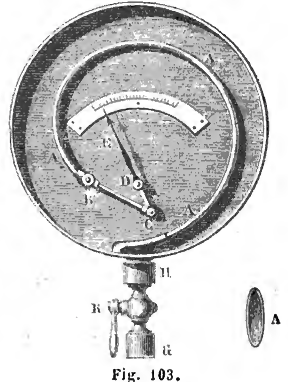


Fig. 103.

Dès que la vapeur exerce sa pression à l'intérieur du tube, il se produit des déformations dans la section du tube, qui est figurée à part en A, et ces déformations font elles-mêmes varier la position de B, et par suite celle de l'aiguille sur le cadran. Ces appareils se graduent par comparaison avec un manomètre à air libre.

---

# CHAPITRE VII

## MACHINE PNEUMATIQUE. — MACHINE DE COMPRESSION. POMPES. — SIPHON.

### MACHINE PNEUMATIQUE.

127. La machine pneumatique est un instrument destiné à enlever l'air d'un récipient quelconque. Elle fut inventée vers 1650 par Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg.

Elle a reçu, depuis cette époque, de nombreux perfectionnements; mais pour en faire comprendre plus facilement le jeu,

nous la prendrons d'abord à peu près telle que la construisit Otto de Guéricke. Soit un corps de pompe C (fig. 104) qui communique avec un récipient R, et dans lequel peut se mouvoir le piston P. A la base inférieure du corps de pompe se trouve une soupape S capable de s'ouvrir de bas en haut : le piston est percé d'une ouverture fermée par une soupape S' capable aussi de s'ouvrir de bas en haut. Le piston P étant en haut de sa course, et les soupapes S et S' étant fermées, baissons le piston. L'air du corps de pompe se trouvant comprimé, sa force élastique augmentera, et à un moment donné, elle sera assez grande pour soulever la soupape S'; l'air s'échappera alors du corps de pompe, et quand le piston sera arrivé au bas de sa course, si nous supposons qu'il y ait contact intime entre lui et la base inférieure du corps de pompe, tout l'air que celui-ci contenait sera chassé. Soulevons maintenant le piston, il laissera au-dessous de lui le vide dans le corps de pompe, et la soupape S, pressée de bas en haut par la force élastique de l'air du récipient qui n'est contre-balancée par rien, s'ouvrira : une partie de l'air du récipient se précipitera alors dans le corps de pompe. Quand le piston sera arrivé en haut de sa course, la soupape S, également pressée de part et d'autre, retombera en vertu de son poids et la force élastique de l'air sera la même dans tout l'appareil, mais elle sera moindre qu'au début de l'opération. Le piston étant abaissé de nouveau, un volume d'air égal à celui du corps de pompe s'échappera de l'appareil, et ainsi de suite. On voit donc que chaque fois que le piston descend, il fait sortir de l'appareil un volume d'air égal au volume du corps de pompe ; il en résulte que le récipient se vide de plus en plus.

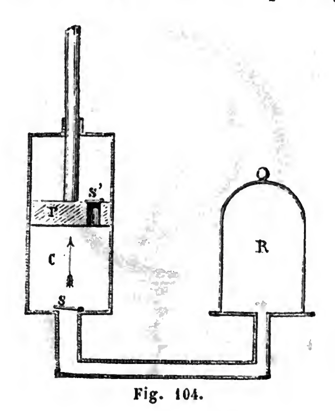


Fig. 104.

Il est évident, *à priori*, que le vide fait par cet appareil ne pourra jamais être absolu, puisqu'à chaque coup de piston l'air

intérieur ne fait que se fractionner entre le récipient et le corps de pompe.

La machine que nous venons de décrire présente plusieurs inconvénients que nous allons signaler. A chaque fois que la soupape S se soulève, l'air du récipient se répandant dans un espace plus grand, sa force élastique diminue en vertu de la loi de Mariotte; elle va donc toujours en décroissant, et il arrive un moment où elle n'est plus assez grande pour soulever la soupape S. Celle-ci restant fermée, l'appareil cesse de fonctionner. Remarquons aussi que dans une machine à un seul corps de pompe, comme celle que nous venons de décrire, à mesure que l'air se raréfie dans le récipient, il devient de plus en plus difficile de soulever le piston, puisque l'air intérieur exerçant sur la face inférieure du piston une pression qui devient de moins en moins grande, la pression exercée par l'atmosphère sur la face supérieure est de moins en moins contre-balancée, et, à mesure que l'opération avance, on a à vaincre une résistance de plus en plus considérable. La machine à deux corps de pompe que nous allons décrire est exempte des deux inconvénients que nous venons de signaler.

128. **Machine pneumatique à deux corps de pompe.** — La machine pneumatique, perfectionnée successivement par Boyle[1] et Papin[2], est maintenant construite de la manière suivante.

Deux corps de pompe en cristal C, C′ (fig. 105), contenant chacun un piston, communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte A, qui vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau P ou platine. Celle-ci est formée d'une plaque de cristal absolument plane sur laquelle on pose une cloche, dont les bords sont parfaitement rodés, de manière à s'appliquer exactement sur la platine. C'est sous cette cloche que l'on place les objets autour desquels on veut faire le vide.

Les pistons sont formés de rondelles en cuir pressées entre deux plaques métalliques serrées par un écrou EE′ (fig. 106). Le corps de chaque piston est creux et contient une petite plaque appliquée par un ressort à boudin sur le trou par lequel l'air doit s'é-

[1] Boyle (Robert), savant anglais, né à Lysmore, en Irlande, en 1626, mort en 1691.

[2] Papin (Denis), né à Blois vers 1650, mort en 1710.

chapper du corps de pompe. Lorsque le piston descend, l'air se comprime et sa force élastique triomphant de la résistance du ressort à boudin soulève la plaque.

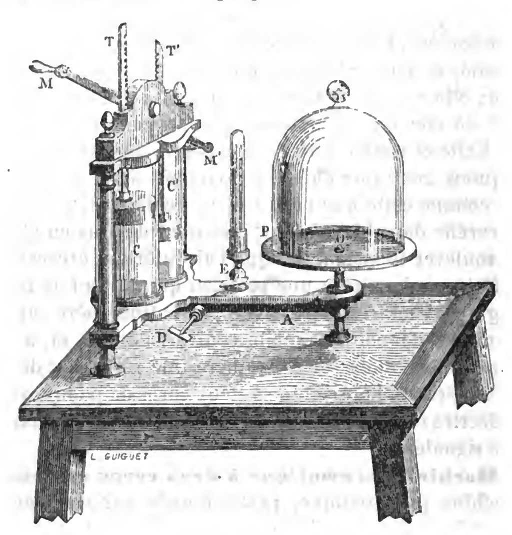



Fig. 105.

Le piston est traversé par une tige métallique HI (fig. 107) qui passe à frottement dur et qui se termine inférieurement par un bouchon conique I. Ce bouchon doit s'engager dans l'ouverture du conduit menant au récipient et sert de soupape. Dès que le piston se soulève, il entraîne avec lui la tige et le bouchon; mais aussitôt que l'ouverture est débouchée, un arrêt K situé à la partie supérieure vient buter contre la base supérieure du corps de pompe, la tige s'arrête, et c'est le piston qui glisse sur elle. Quand le piston, après avoir accompli sa course ascensionnelle, redescend, la tige KI le suit encore pendant un instant; mais dès que la soupape conique est venue s'appliquer dans l'ouverture, le piston glisse de nouveau le long de la tige. On comprend qu'il était important que la soupape ne s'élevât pas trop haut, car s'il s'écoulait un temps trop long entre l'instant où le piston com-

mence à redescendre et celui où la soupape conique bouche de nouveau l'ouverture, la plus grande partie de l'air qui, au coup de piston précédent, a passé du récipient dans le corps de pompe, retournerait dans le récipient. On voit d'ailleurs que par cette dis-

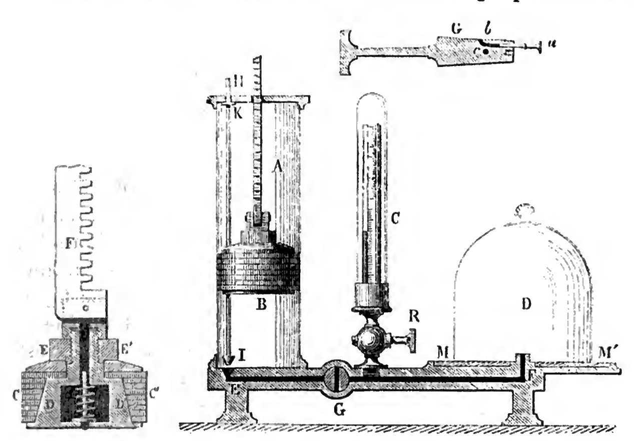



Fig. 106. Fig. 107.

position les soupapes qui établissent les communications avec le récipient fonctionnent toujours, quelle que soit la raréfaction de l'air intérieur.

Chaque piston porte une tige à crémaillère qui engrène avec une roue dentée. Cette roue est mise en mouvement par une manivelle MM' (fig. 105). On voit que lorsqu'un des pistons monte l'autre descend. Il en résulte que les pressions exercées par l'atmosphère sur les faces supérieures se font équilibre, puisque le poids de l'atmosphère tend à faire descendre l'un avec une puissance à peu près égale à la résistance qu'il oppose à l'ascension de l'autre. Quant aux pressions qui s'exercent sur les faces inférieures, elles diffèrent très-peu, et l'on n'a à vaincre que leur différence.

Pour apprécier la force élastique de l'air qui reste dans le récipient, on adapte à la machine (fig. 107) un petit baromètre à siphon établi dans une éprouvette C à fortes parois qui commu-

nique par un robinet avec le canal d'aspiration. Il est appelé baromètre tronqué. Sa branche fermée a environ $0^m,20$ de hauteur. Tant que la force élastique de l'air du récipient est supérieure à $0^m,20$, cette branche reste pleine; mais dès qu'elle est inférieure à $0^m,20$, le mercure commence à descendre dans la branche fermée et s'élève dans l'autre; si le vide devenait absolu, les deux niveaux seraient dans un même plan horizontal, et c'est dans ce plan que se trouve le zéro de la graduation qui permet d'évaluer le degré de vide.

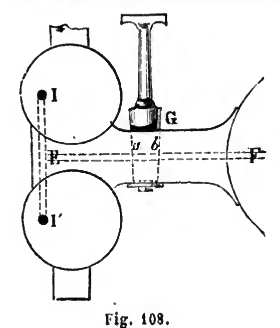



Fig. 108.

Enfin, sur le conduit d'aspiration se trouve un robinet ou clef G (fig. 107), qui permet de mettre les corps de pompe en communication avec le récipient. La figure 108 représente cet état de choses. Le conduit *ab* de la clef G est, comme on le voit, dans la direction du conduit d'aspiration EF.

Lorsque le vide est fait, pour empêcher la rentrée de l'air par les soupapes des pistons, on ferme toute communication entre le récipient et les corps de

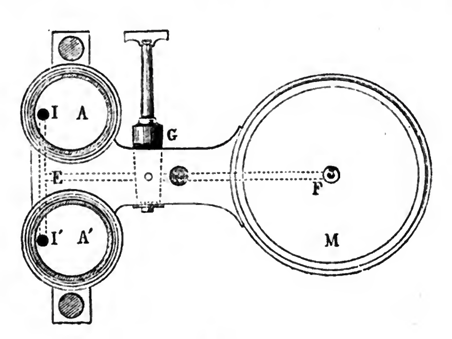



Fig. 109.

pompe. Pour cela on tourne la clef de 90°, c'est ce que représente la figure 109.

Enfin la clef G porte un canal *b* (fig. 110) qui, d'abord parallèle à son axe, se recourbe rectangulairement; un petit bouchon métallique *a* entre dans ce canal, et lorsqu'on veut laisser rentrer l'air dans le récipient, il suffit de placer la clef dans la position de la figure 108, d'enlever le bouchon métallique, et alors l'air rentre en sifflant par le conduit. Nous remarquerons que cette opération est nécessaire pour qu'on puisse enlever la cloche de dessus la platine de la machine. Tant que le vide est fait, la

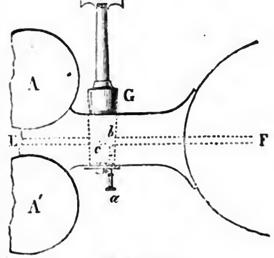


Fig. 110.

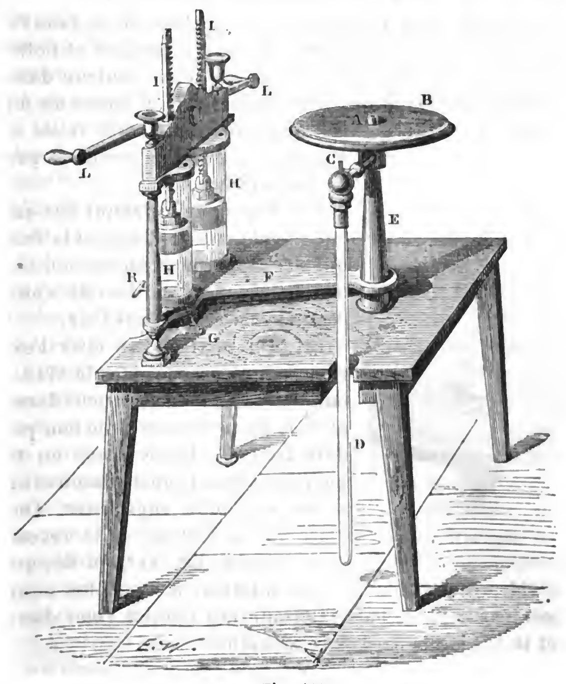


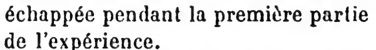
Fig. 111.

cloche étant appuyée sur la platine par la pression de l'atmosphère, il est impossible de la soulever.

La figure 111 représente une machine pneumatique un peu différente de la précédente ; la platine est portée par une colonne E; le baromètre tronqué est remplacé par un baromètre entier placé en CD. La clef est en R et l'air peut rentrer sous le récipient par un conduit latéral qui, sur la figure, est fermé par un bouchon G.

129. Parmi les expériences que l'on peut faire avec la machine pneumatique, nous rappellerons les expériences des hémisphères de Magdebourg, du crève-vessie, du récipient à main, du coupe-pommes, de la pluie de mercure.

Un animal placé sous la cloche de la machine pneumatique tombe sans vie dès que le vide se fait et qu'on lui enlève l'air nécessaire à la respiration. Un poisson placé dans l'eau sous le récipient de la machine monte à la surface et flotte le ventre en l'air à cause de l'expansion du gaz contenu dans sa vessie natatoire. Quand on laisse rentrer l'air, il tombe au fond, parce qu'une partie des gaz que renfermait cette vessie s'est



échappée pendant la première partie de l'expérience.

130. Une bougie s'éteint dès qu'on fait le vide autour d'elle, et la fumée qui s'échappe de la mèche tombe au bas du récipient, au lieu de s'élever comme cela a lieu dans l'air.

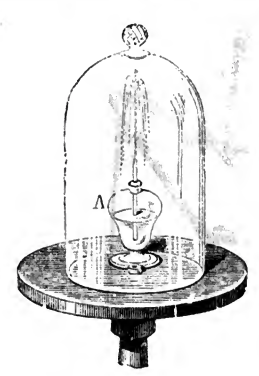



Fig. 112.

131. On peut encore citer l'expérience du jet d'eau dans le vide. On emplit d'eau à moitié un petit flacon A et on le ferme avec un bouchon percé d'un trou qui laisse passer un tube plongeant dans l'eau du flacon et effilé à son extrémité supérieure. On le place sur la platine, on le recouvre d'une cloche (fig. 112), et dès qu'on fait le vide, la pression de l'air intérieur n'étant plus contrebalancée par celle de l'air extérieur fait monter l'eau dans le tube et la fait jaillir par l'extrémité effilée.

MACHINE DE COMPRESSION.

132. La machine de compression, réduite à son plus grand état de simplicité, se compose d'un corps de pompe C (fig. 113) mis en communication avec un récipient R. Le piston qui se meut dans ce corps de pompe porte une soupape S′ s'ouvrant de haut en bas; le canal de communication avec le récipient est fermé à son entrée par une soupape S s'ouvrant aussi de haut en bas. On voit que le jeu des soupapes est inverse de celui que nous avons vu dans la machine pneumatique. Aussi l'effet produit sera-t-il inverse aussi.

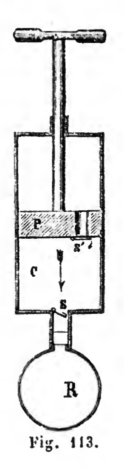


Fig. 113.

Supposons le piston en haut de sa course. Abaissons-le : l'air contenu dans le corps de pompe se comprime, sa force élastique augmente, et pendant qu'elle maintient fermée la soupape S′, elle fait ouvrir la soupape S. A mesure que le piston descend, l'air est donc refoulé dans le récipient R, où sa force élastique devient supérieure à celle de l'atmosphère. Le piston étant arrivé au bas de sa course, soulevons-le ; le vide se fait en C, la soupape S se referme par l'action de l'air du récipient et la pression de l'atmosphère faisant ouvrir la soupape S′, l'air extérieur rentre dans le corps de pompe. Lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, il est entré dans l'appareil un volume d'air égal au volume du corps de pompe. Ce volume d'air sera à son tour refoulé dans le récipient à la première descente du piston, et ainsi de suite.

On voit que cet appareil produit un effet inverse de celui de la machine pneumatique, puisque, grâce à lui, on peut accumuler dans le récipient des quantités d'air de plus en plus considérables. Nous remarquerons que la machine de compression cessera de fonctionner dès que la force élastique de l'air dans le récipient sera supérieure à celle qu'acquiert l'air du corps de pompe par la compression que lui fait subir la descente du piston. On comprend qu'on pourrait remplacer le piston que nous venons de décrire par un piston plein, en ayant soin de pratiquer sur la surface du

corps de pompe une ouverture susceptible d'être ouverte ou fermée par une soupape manœuvrant de dehors en dedans. C'est cette disposition qu'on adopte pour la fontaine de compression que nous allons décrire.

133. **Fontaine de compression.** — Un récipient métallique FGH (fig. 114) est en partie rempli d'eau : un tube I plonge dans l'appareil et se termine par une partie renflée percée de trous, comme une pomme d'arrosoir. Au-dessus du robinet D on visse une machine de compression réduite à son corps de pompe.

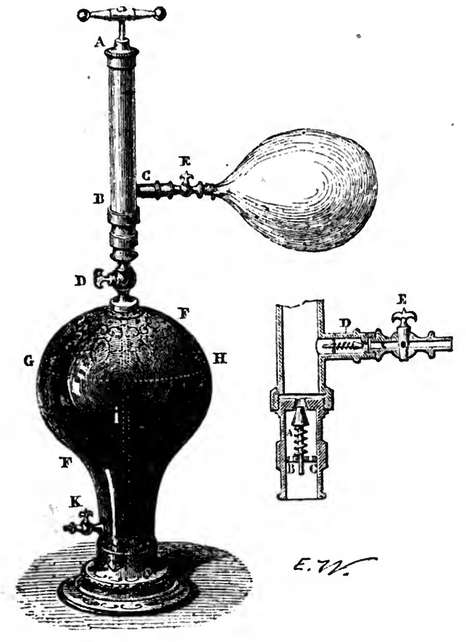



Fig. 114. Fig. 115.

Le détail des soupapes est représenté par la figure 115. La tubulure D s'ouvre dans l'atmosphère, ou bien est en communication avec un espace rempli de gaz. Dès qu'on fait jouer le piston, le gaz est refoulé dans l'appareil, monte à travers le liquide et vient

s'accumuler dans la partie supérieure du récipient. Dès qu'on en a introduit une quantité suffisante, on ferme le robinet D (fig. 114) et on remplace le corps de pompe par un ajutage. Si l'on ouvre alors de nouveau le robinet D, l'air comprimé à l'intérieur exerçant sa force élastique sur l'eau la fait monter à travers le tube I, et la projette avec force au dehors.

**134. Fontaine de Héron.** — C'est encore la force élastique de l'air comprimé qui produit le jet d'eau dans la fontaine de Héron. Elle se compose de trois vases A, B, C (fig. 116), placés les uns au-dessus des autres et reliés par des tubes métalliques. Un tube E partant du fond du vase A traverse le vase B et va aboutir au fond du vase C. Un tube D partant de la partie supérieure de C va se terminer en haut du vase B. Enfin un tube plus court que les précédents part d'un ajutage à robinet situé au centre du vase A et va s'ouvrir au fond de B. On commence, à l'aide d'un trou pratiqué dans la cuvette A, par verser de l'eau dans le vase B; puis on verse dans A de l'eau qui s'écoule dans le vase C, et qui, à mesure qu'elle y arrive, refoule l'air qu'il contient par le tube D dans la partie supérieure de B. Là, l'air se comprime, sa force élastique augmente, et dès qu'on ouvre le robinet de l'ajutage, l'eau poussée dans le tube court s'échappe au dehors sous la forme de jet.

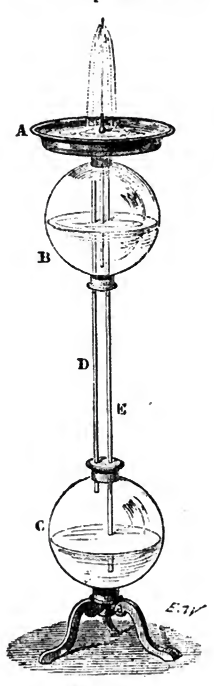


Fig. 116.

**135. Fusil à vent.** — Cet instrument est destiné, comme son nom l'indique, à lancer des projectiles par la force élastique de l'air comprimé. La crosse C (fig. 117) est constituée par un réservoir à soupape : le canal *ab* peut être fermé par cette soupape que presse un ressort à boudin ; on visse sur la crosse une machine de compression à l'aide de laquelle on comprime de l'air dans le réservoir. Puis on enlève cette machine que l'on rem-

place par un canon destiné à recevoir le projectile. Une détente que le mouvement du chien fait partir ouvre la soupape pendant un instant très-court : l'air se précipite avec violence dans le canon, chasse la balle, et la soupape se referme aussitôt.

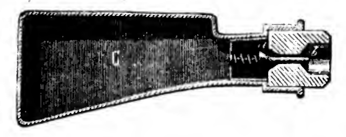



Fig. 117.

136. **Soufflets.** — Les soufflets d'appartement dont nous nous servons pour activer la combustion dans nos foyers se composent de deux tablettes A et B (fig. 118) réunies par une lame

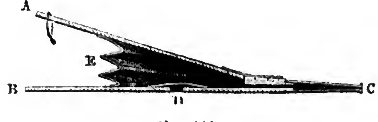



Fig. 118.

de cuir soutenue par des cerceaux : en D se trouve une soupape s'ouvrant de dehors en dedans. Le réservoir E se prolonge par un tuyau C appelé tuyère. Supposons d'abord les deux tablettes à peu près appliquées l'une contre l'autre; dès qu'on les écarte, la soupape D se soulève et laisse rentrer l'air extérieur; dès qu'on les approche, l'air du réservoir se comprime, referme la soupape D et s'échappe par la tuyère C.

137. **Soufflets à vent continu.** — Le soufflet que nous venons de décrire ne donne qu'un jet d'air intermittent. Lorsqu'on veut un jet continu, on se sert du soufflet à double vent qui est employé dans les forges.

Il est formé de trois tablettes A,B,C (fig. 119), dont l'une B est fixe : elles sont réunies par des lames de cuir de manière à former deux compartiments P et Q. En S se trouve une soupape s'ouvrant de dehors en dedans, en S' une autre soupape s'ouvrant de P vers Q, enfin la tuyère T vient aboutir dans le compartiment Q. Si l'on soulève la tablette C, l'air comprimé en P fait ouvrir la soupape S' et passant dans le compartiment Q soulève la tablette A, en même temps qu'une partie s'écoule par la tuyère. Si on laisse ensuite retomber la tablette C à laquelle est suspendu un poids M, la soupape S' se referme et l'air exté-

rieur rentre dans P par la soupape S. Mais pendant ce temps l'écoulement du gaz continue par la tuyère T, sous l'action d'un

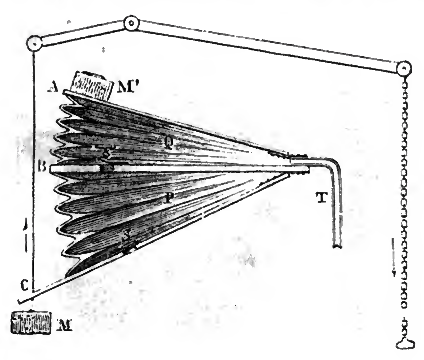



Fig. 119.

poids M' qui, placé sur la tablette A, tend toujours à l'abaisser. L'insufflation est alors un peu moins forte.

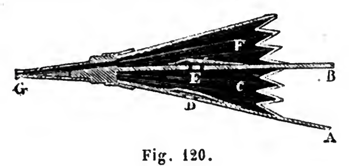



Fig. 120.

Dans les petits soufflets d'appartement à vent continu (fig. 120), le poids M' est remplacé par un ressort qui tend toujours à rapprocher les tablettes extrêmes.

138. **Machines soufflantes.** — Les machines soufflantes que l'on emploie si souvent dans les usines et, en particulier, dans les établissements métallurgiques, pour lancer de l'air dans les fourneaux et activer la combustion, sont de diverses formes. Tantôt ce sont d'énormes soufflets comme ceux que nous venons de décrire; tantôt elles se composent essentiellement d'un très-large corps de pompe A (fig. 121), dont le piston P est mis en mouvement par une machine à vapeur ou par une roue hydraulique; $c$, $c''$, $c'$, $c'''$ sont quatre soupapes; les deux soupapes

$c'$, $c''$ s'ouvrent de dehors en dedans et donnent accès à l'air extérieur. Lorsque le piston descend, les soupapes sont dans la

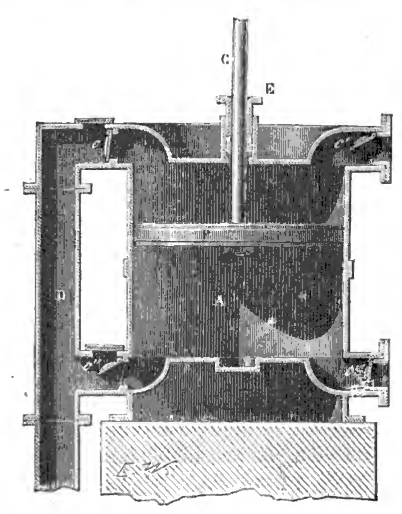



Fig. 121.

position représentée par la figure, l'air entre par $c'$ et sort par $c''$. Lorsque le piston monte, la disposition est inverse, l'air entre par $c'''$ et sort par $c''$.

## POMPES.

139. Les pompes servent à élever les liquides à une hauteur plus ou moins considérable au-dessus du réservoir où ils sont contenus. Nous les diviserons en trois classes :

1° Pompes aspirantes ; 2° pompes foulantes ; 3° pompes aspirantes et foulantes.

140. **Pompe aspirante.** — Dans la pompe aspirante, le piston A (fig. 122) reçoit un mouvement de va-et-vient dans l'intérieur d'un corps de pompe B qui communique par un tuyau d'aspiration C avec le réservoir où l'on veut puiser l'eau et qu'on

appelle *puisard*. Une soupape D, s'ouvrant de bas en haut, est placée à l'entrée du tuyau d'aspiration. Le piston est percé de deux ouvertures sur lesquelles s'appliquent deux soupapes s'ouvrant de bas en haut (fig. 123). Un tuyau de déversement E est greffé à la partie supérieure du corps de pompe.

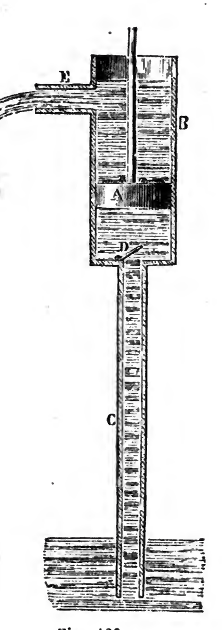


Fig. 123.

Supposons le piston au bas de sa course : s'il s'élève, le vide se fait au-dessous de lui, et l'air contenu dans le tuyau d'aspiration soulève la soupape D pour se rendre en partie dans le corps de pompe ; mais, par suite de cette augmentation de volume, sa force élastique diminue, et le liquide qui était au même niveau dans le tuyau C et dans le puisard, s'élève dans le tuyau, jusqu'à ce que la colonne soulevée, augmentée de la force élastique de l'air qui la surmonte, fasse équilibre à l'atmosphère, dont la pression s'exerce sur la surface de l'eau dans le puisard. Pendant cette première ascension du piston, ses soupapes sont restées fermées; dès qu'il descend, elles s'ouvrent par suite de la compression de l'air dont elles laissent échapper un volume égal au volume du corps de pompe. Quand le piston, arrivé au bas de sa course, est de nouveau soulevé, les mêmes phénomènes se reproduisent ; une nouvelle quantité d'air est extraite du tuyau d'aspiration, et une nouvelle quantité d'eau s'y élève. On voit que cette pompe va fonctionner comme une véritable machine pneumatique, jusqu'à ce que tout l'air en ait été extrait et remplacé par l'eau qui arrive du puisard. A ce moment on dit que la pompe est *amorcée*. Si alors on continue à

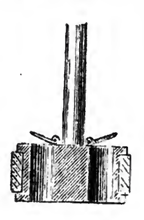


Fig. 122.

faire fonctionner le piston, chaque fois qu'il descend, l'eau enfermée dans le corps de pompe passe au-dessus de lui en soulevant les soupapes, et chaque fois qu'il remonte, il élève l'eau qui se trouve sur sa face supérieure, la fait écouler par le conduit E, et en même temps aspire une nouvelle quantité de liquide du puisard.

Cette explication suppose évidemment que la distance qui sépare la base inférieure du piston du niveau de l'eau dans le puisard doit, pour toutes les positions du piston, être toujours inférieure à 10m,33. On se rappelle en effet que la pression atmosphérique équivaut ordinairement à une colonne d'eau de 10m,33 environ, et c'est elle qui fait monter l'eau dans la pompe. Dans la pratique, cette distance ne doit même pas être aussi grande, à cause des imperfections de construction qui ne permettent pas de faire avec ces instruments un vide complet. Elle ne doit pas dépasser 8 mètres environ.

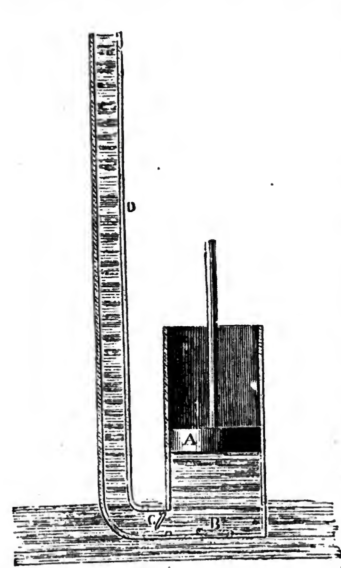


Fig. 124.

141. **Pompe foulante.** — Dans la pompe foulante un piston plein A (fig. 124) reçoit un mouvement de va-et-vient dans un corps de pompe qui plonge au milieu de l'eau. Une ouverture pratiquée à la base inférieure du corps de pompe est munie d'une soupape B capable de s'ouvrir de bas en haut; une autre ouverture, pratiquée aussi au bas du corps de pompe sur la paroi latérale, le met en communication avec un tuyau D dans lequel l'eau doit être élevée : une soupape C s'ouvrant de dedans en dehors est établie sur cette ouverture. Lorsque le piston s'élève, le vide se fait au-dessous de lui. La pression atmosphérique qui s'exerce sur le

niveau du puisard se transmet de bas en haut à la soupape B, force cette soupape à se soulever et l'eau à suivre le piston en remplissant le corps de pompe. Lorsque le piston, parvenu en haut de sa course, s'arrête, la soupape B retombe en vertu de son poids. Puis, lorsqu'on fait descendre le piston, la pression qu'il exerce sur l'eau se transmet à la soupape C et l'ouvre : le liquide pénètre dans le tuyau D et s'y élève à une certaine hauteur. Après un nombre suffisant de coups de piston, souvent après un seul, le tuyau D est rempli et l'eau se déverse à la partie supérieure.

142. **Pompe à incendie.** — La pompe à incendie (fig. 125) est une véritable pompe foulante modifiée de manière à fournir

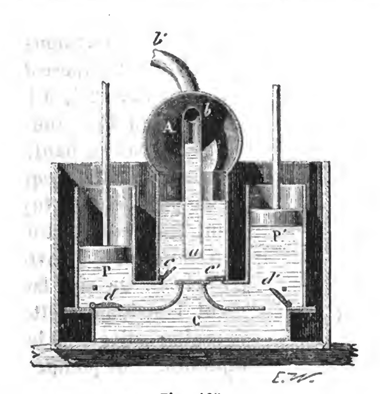



Fig. 125.

un jet d'eau régulier et continu. Il est évident que dans la pompe foulante que nous venons de décrire, l'eau cesse de jaillir par le tuyau de déversement chaque fois que le piston s'élève dans le corps de pompe. Dans la pompe à incendie, on accouple deux corps de pompe, comme dans la machine pneumatique : ils plongent dans une bâche où l'on verse de l'eau ; les pistons P et P' se meuvent en même temps, mais en sens contraire. Pendant que le piston P' montant aspire l'eau par la soupape *d'* et cesse d'en envoyer au dehors, le piston P descendant refoule le liquide par la soupape *c*. De cette manière, le jet n'est pas interrompu ; mais malgré

cette disposition, il ne serait pas encore régulier, il se ralentirait sensiblement au moment où les pistons changeraient de sens dans leur mouvement. Pour éviter cet inconvénient, le liquide, avant de se rendre dans le tuyau de refoulement, est envoyé dans un réservoir à air A qui communique avec les corps de pompe par les soupapes *c* et *c'*. L'eau, en arrivant dans ce réservoir, comprime au-dessus d'elle l'air qu'il contient et la force élastique de celui-ci réagissant sur elle la pousse dans le tuyau *bb'* qui descend jusqu'au fond du réservoir. De cette manière, au moment où les pistons changeant de sens cessent de refouler, l'air agit et entretient un jet régulier.

143. **Pompe aspirante et foulante.** — La pompe aspirante et foulante est, comme son nom l'indique, une combinaison des deux pompes que nous venons de décrire. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration (fig. 126), à la partie supérieure duquel est une soupape *s* s'ouvrant de bas en haut, d'un corps de pompe ABCD dans lequel se meut un piston plein, et d'un tuyau de refoulement T à l'entrée duquel se trouve une soupape *s'*, s'ouvrant de dedans en dehors. On voit facilement comment fonctionne cette pompe : elle joue alternativement le rôle de pompe aspirante et de pompe foulante.

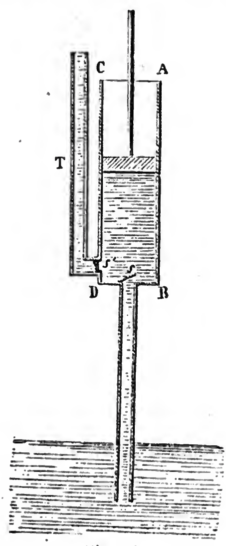


Fig. 126.

144. **Pompe aspirante et élévatoire.** — On donne le nom de pompe aspirante et élévatoire à une pompe qui n'est qu'une modification de la précédente. Le corps de pompe est fermé à sa base supérieure (fig. 127); il porte dans le haut un tuyau d'élévation R. Le piston est muni d'ouvertures garnies de soupapes s'ouvrant de bas en haut. Il est facile de comprendre que lorsque le piston s'élève, l'eau du puisard est aspirée, la soupape S' étant ouverte; qu'en même temps l'eau qui se trouve au-dessus du piston est soulevée par lui, les soupapes S, S étant fermées. D'autre part, lorsque le pis-

ton descend, la soupape S' se ferme et, les soupapes S, S s'ouvrant, l'eau aspirée pendant le mouvement précédent du piston passe au-dessus de celui-ci.

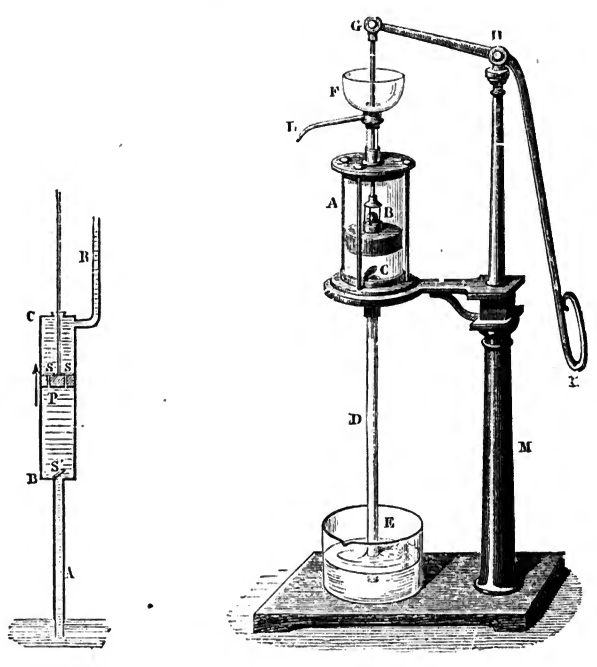



Fig. 127. Fig. 128.

La figure 128 représente un modèle de pompe aspirante et élévatoire employée dans les cabinets de physique.

145. **Pompes de mines.** — L'épuisement des eaux qui affluent dans les mines se fait au moyen de pompes. Mais comme les puits de mines sont souvent très-profonds, le tuyau d'aspiration devrait avoir une longueur supérieure à $10^m,33$, auquel cas la pompe ne peut plus fonctionner. Pour surmonter cet obstacle, on divise le puits en plusieurs étages, et à chaque étage se trouve une pompe qui refoule l'eau à l'étage supérieur.

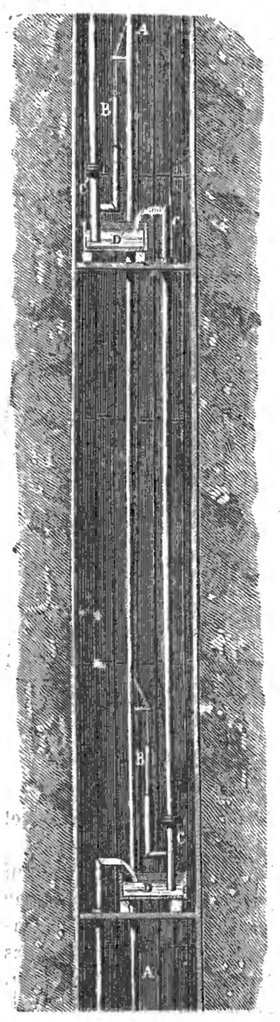


Fig. 129.

Une même tige AA (fig. 129), qui s'étend du haut en bas du puits, et que l'on nomme *tige maîtresse*, porte les pistons B, B' des diverses pompes: elle est animée d'un mouvement de va-et-vient; le piston A aspire l'eau dans le réservoir inférieur, la refoule dans le tube CC qui va la déverser dans un réservoir supérieur où elle est ellemême aspirée par le piston B' et refoulée dans le tube C', qui la conduit plus haut, et ainsi de suite.

## SIPHONS.

146. Les siphons sont des tubes recourbés, à branches ordinairement inégales et tels que ABC

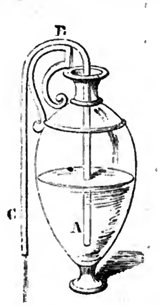


Fig. 130.

(fig. 130), et ABCD (fig. 131). Ils sont depuis longtemps employés à transvaser les liquides. Pour cela on remplit ABCD d'eau (fig. 131), et, après avoir plongé la courte branche AB dans l'eau du vase XX', on

débouche l'ouverture D, le liquide s'écoule alors en D avec une vitesse d'autant plus grande que la différence de longueur entre les deux branches est plus considérable. On peut aussi plonger la petite branche du siphon vide dans XX' et aspirer en D avec la bouche. La pression atmosphérique qui s'exerce sur XX' pousse l'eau dans le siphon et le remplit. On retire alors la bouche, et le liquide s'écoule par l'extrémité D.

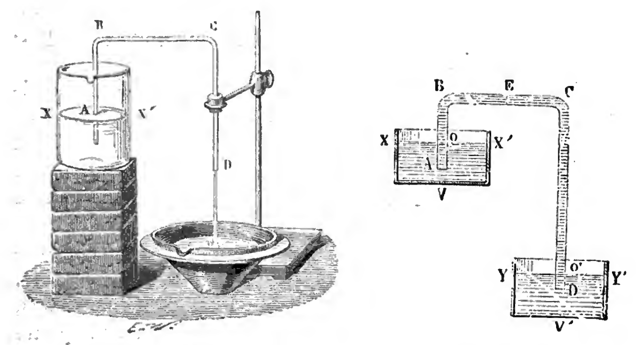



Fig. 131. Fig. 132.

Pour expliquer le jeu du siphon, supposons-le plein de liquide, c'est-à-dire amorcé. Supposons de plus (fig. 132) que la longueur OB soit de 25 centimètres et la longueur CO' de 90 centimètres, que la pression atmosphérique exprimée en colonne d'eau soit de 10 mètres. Considérons dans la branche BC une tranche liquide E, et voyons quelle pression elle supporte de gauche à droite et de droite à gauche; si l'une est plus forte que l'autre, elle poussera le liquide dans son sens. La pression atmosphérique s'exerçant sur le niveau XX' se transmet dans le tube; mais lorsqu'elle arrive en E, son effet est évidemment diminué du poids de la colonne liquide soulevée dans BO. Nous pourrons donc regarder la pression qui s'exerce de gauche à droite comme représentée par 10 mètres moins 25 centimètres, c'est-à-dire $9^{m},75$. Pour la même raison, la pression qui s'exerce en E de droite à gauche peut être représentée par une colonne de 10 mètres moins 95 centimètres, c'est-à-dire $9^{m},05$. Donc c'est la pression de gauche à droite qui l'emporte; la tranche E est poussée vers CO';

et, comme on peut répéter le même raisonnement pour chaque tranche du tube BC, le liquide s'écoule par la grande branche.

Quand le liquide qu'on veut transvaser ne peut être introduit dans la bouche sans inconvénient, on amorce le siphon en aspirant par un tube latéral ABC (fig. 133). Ce tube porte un renflement dans lequel le liquide se répand avec lenteur, et, quand le siphon est plein, on a le temps de retirer la bouche avant que le liquide y soit parvenu.

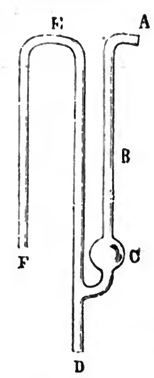


Fig. 133.

Nous ferons remarquer que lorsque les siphons ont une section un peu considérable, ils doivent, pour fonctionner, avoir leurs deux orifices submergés, comme le représente la figure 132, sans quoi l'air remonterait dans la grande branche et diviserait la colonne.

Le siphon est souvent employé dans le commerce pour transvaser les vins, les acides, etc. Quand les siphons sont de grandes dimensions, on les met en place et on fait jouer, pour aspirer l'air, une petite pompe fixée à leur partie supérieure.

147. **Vase de Tantale.** — Le vase de Tantale, que l'on trouve dans tous les cabinets de physique, présente une application de la théorie du siphon. C'est un vase qui se vide de lui-même dès que le liquide donton cherche à l'emplir atteint un certain niveau. Le pied d'un verre AB (fig. 134) est percé d'un trou qui laisse passer un tube recourbé CD jouant le rôle de siphon. On verse de l'eau dans le vase AB; à mesure que le liquide monte dans AB, il monte aussi dans le tube CD d'après le principe des vases communiquants. Dès que l'eau dépasse le niveau supérieur du siphon, celui-ci s'amorce et l'eau s'écoule par le pied du vase à mesure qu'on en verse de nouvelle.

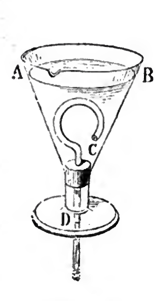


Fig. 134.

148. **Fontaines intermittentes naturelles.** — Les fontaines intermittentes naturelles nous offrent encore une application de la théorie du siphon. Supposons qu'une cavité souter-

raine G (fig. 135) soit mise en communication avec l'extérieur par une fissure recourbée ABC. Tant que les pluies en s'infiltrant, n'auront point accumulé dans la cavité un volume d'eau suffisant pour que le niveau s'élève au-dessus de la courbure B, l'eau

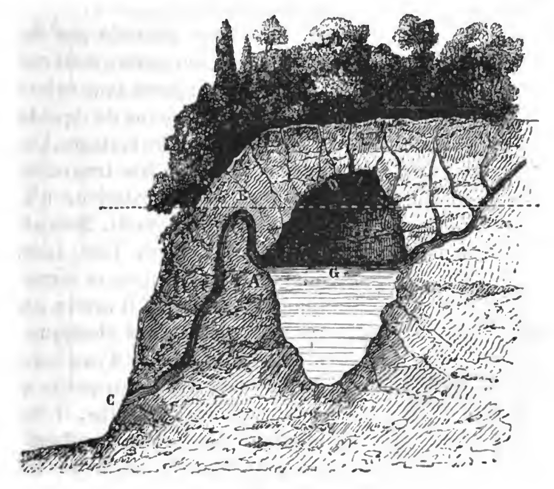



Fig. 135.

prendra le même niveau dans la branche AB et dans la cavité; mais dès que le niveau aura atteint le sommet B, le siphon ABC sera amorcé et l'eau de la cavité s'écoulera jusqu'à ce que l'orifice A soit à découvert. La source cessera alors de couler en C, jusqu'à ce que, la cavité se remplissant de nouveau, le liquide arrive au niveau du point B.

149. **Fontaine intermittente de Sturmius.** — On trouve dans les cabinets de physique un appareil connu sous le nom de fontaine intermittente et dont le jeu repose sur des principes différents. Elle se compose du vase A (fig. 136) bouché à l'émeri à sa partie supérieure et mastiqué à sa partie inférieure dans une virole en cuivre portant de petits ajutages en D, D′, D″. Un tube B traverse la virole, va s'ouvrir à la partie supérieure A et descend jusque dans un bassin C, au milieu duquel il est supporté par un trépied. Ce bassin est percé d'un trou central.

Voici le jeu de cet appareil. On verse de l'eau dans le vase A et on le bouche. La pression de l'atmosphère qui s'exerce par le tube B sur le niveau du liquide dans le vase étant contre-balancée par la même pression exercée à l'orifice des ajutages, l'eau s'écoule par ceux-ci en vertu de son poids; mais comme le trou central percé dans le bassin C laisse écouler moins de liquide que n'en fournissent les ajutages, l'orifice inférieur du tube B se trouve bientôt immergé, et l'air extérieur n'a plus d'accès dans l'appareil. Mais alors le liquide s'écoulant, l'air intérieur augmente de volume, sa force élastique diminue, et il arrive un moment où cette force élastique augmentée de la colonne d'eau contenue dans le vase A est plus petite que la pression atmosphérique. L'écoulement s'arrête alors. Pendant qu'il est suspendu, le bassin se vide, et l'orifice inférieur de B se trouvant mis à nu, l'air peut entrer à l'intérieur, et l'écoulement recommence jusqu'à ce qu'il soit encore arrêté par le même motif que tout à l'heure, et ainsi de suite.

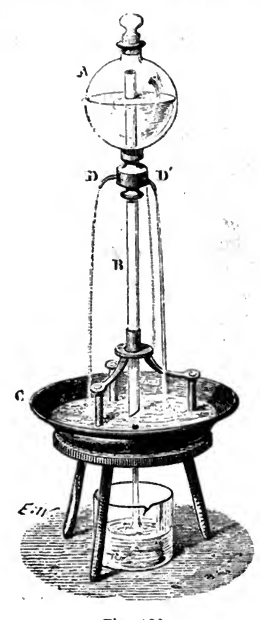


Fig. 133.

150. **Pipette.** — On emploie souvent dans les laboratoires, pour transvaser de petites quantités de liquides, un instrument connu sous le nom de *pipette*. Il se compose d'un tube ABCD (fig. 137) renflé en son milieu et terminé à son extrémité inférieure par un orifice très-étroit. On plonge la pipette dans le liquide que l'on veut transvaser, les niveaux à l'intérieur et à l'extérieur se mettent sur le prolongement l'un de l'autre, et l'instrument s'emplit. Si alors on bouche avec le doigt l'orifice supérieur A, on peut soulever la pipette hors de l'eau, sans que le liquide s'échappe. On la transporte alors dans le vase où doit se faire le transvasement, et lorsque l'on soulève le doigt qui bouche l'orifice, le liquide s'écoule. Le jeu de cet instrument s'ex-

plique de la manière suivante : Quand on sort la pipette hors du liquide, une petite quantité de celui qu'elle contient s'écoule par D, mais alors la force élastique de l'air diminuant dans la partie supérieure, l'écoulement s'arrête pour la même raison que dans la fontaine intermittente. Dès qu'on débouche l'orifice A, la pression se rétablit à l'intérieur, et l'écoulement recommence.

Le tâte-vin, dont on fait un fréquent usage pour puiser au milieu d'un tonneau par l'orifice étroit de la bonde, n'est autre qu'une pipette en fer-blanc (fig. 138).

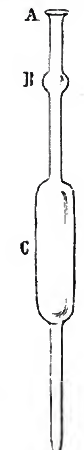


Fig. 137.

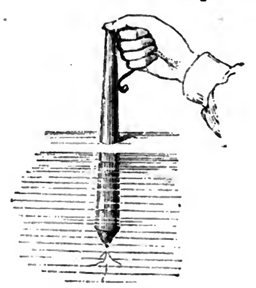


Fig. 138.

---

# CHAPITRE VIII

## EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AUX GAZ. AÉROSTATS. — MÉLANGE DES GAZ. — MÉLANGE DES GAZ ET DES LIQUIDES.

151. Le principe d'Archimède doit s'appliquer aux gaz comme aux liquides, puisque nous avons vu que les conditions d'équilibre des liquides pesants peuvent s'appliquer aux gaz qui

ne sont pas soumis à d'autre force que la pesanteur. Nous admettrons donc qu'*un corps plongé dans l'air subit, de la part de ce fluide, une poussée verticale de bas en haut égale au poids du volume d'air déplacé.*

Du reste, pour démontrer l'existence de cette poussée nous pouvons citer l'expérience suivante dite du *baroscope*, et due à Otto de Guéricke. Mettons en équilibre dans l'air, aux deux extrémités d'un fléau de balance, deux masses de cuivre, l'une massive C (fig. 139), l'autre creuse B et beaucoup plus grosse que la première. Transportons l'appareil sous la cloche de la machine pneumatique et faisons le vide : le fléau s'incline immédiatement du côté de la plus grosse boule ; voici pourquoi : dans l'air, la grosse masse supportait une poussée plus considérable que la petite, puisque le volume déplacé était plus grand ; par conséquent, s'il y avait équilibre malgré cet excès de poussée, c'est que la grosse masse avait un excès de poids sur la petite. Dans le vide, les poussées sont supprimées et l'excès de poids fait incliner le fléau du côté où il agit.

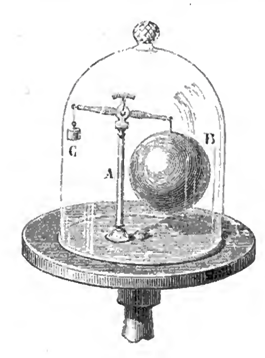


Fig. 139.

152. **Aérostats.** — L'ascension des aérostats au milieu de l'air repose sur le principe précédent. L'idée de leur invention est due à un physicien du dix-septième siècle, F. Lana. Mais les premières expériences ont été faites en 1782 par les frères Montgolfier, fabricants de papiers à Annonay [1].

Ils gonflèrent avec de l'air chaud un globe de toile doublé de papier à l'intérieur et ayant près de 12 mètres de diamètre. Pour cela ils allumèrent un fourneau au-dessous d'une ouverture pratiquée à la partie inférieure du ballon ; celui-ci se gonfla et, comme l'air chaud est plus léger que l'air froid, il subit, dès qu'il fut gonflé, une poussée plus grande que son poids. Sous l'influence de cette poussée, il s'éleva dans l'air avec une vitesse considérable, dès qu'il fut abandonné à lui-même.

[1] Pour l'historique de cette question, voir l'*Histoire des découvertes scientifiques*, par L. Figuier.

Pour entretenir la température de l'air intérieur, on avait suspendu au ballon un réchaud rempli de matières en combustion.

Le 21 octobre 1773, Pilatre de Rozier et le marquis d'Arlande s'aventurèrent dans les airs, portés par une nacelle suspendue à un aérostat construit par Montgolfier. L'expérience faite dans les jardins de la Muette, au bois de Boulogne, en présence du Dauphin et de sa suite, réussit parfaitement. Les deux aéronautes s'élevèrent à une grande hauteur et furent portés au delà de la barrière d'Enfer. Arrivés là, ils cessèrent le feu; la machine s'abattit lentement et se reposa sur *la Butte aux Cailles*, entre le Moulin vieux et le Moulin des merveilles.

Plus tard, Charles, Pilatre de Rozier, Romain, Blanchard, le duc de Chartres, reprirent ces expériences. Pilatre de Rozier et Romain firent, le 5 juin 1785, à Boulogne, une ascension qui leur coûta la vie.

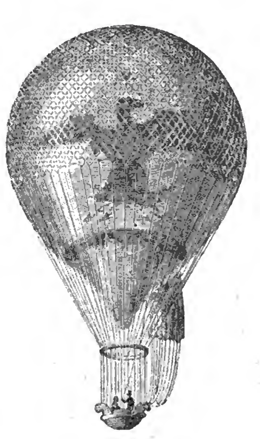


Fig. 140.

On emploie aujourd'hui pour les ascensions aérostatiques des ballons qu'on emplit de gaz hydrogène ou de gaz de l'éclairage. Ces ballons sont faits avec un taffetas verni qui pèse environ 250 grammes par mètre carré. Ils sont enveloppés (fig. 140) d'un filet fait avec des cordes dont les prolongements soutiennent la nacelle.

Le gaz est introduit par la partie inférieure (fig. 141). Une soupape, placée en haut du ballon et que l'aéronaute peut ouvrir à l'aide d'une corde, permet de laisser échapper du gaz. On comprend facilement que la force ascensionnelle d'un aérostat est d'autant plus grande que la différence entre la densité de l'air et celle du gaz qui le gonfle est plus considérable. Elle est égale à la différence qui existe entre le poids de l'air déplacé et le poids du ballon lui-même. Elle croît très-rapidement avec les dimensions de l'aérostat.

Les aéronautes ont l'habitude d'emporter avec eux des sacs de sable qui leur servent de lest. Dès qu'arrivés à une certaine hau-

teur ils veulent s'élever davantage, ils jettent ce lest, et le ballon diminuant de poids, tandis que la poussée reste la même, se dirige bientôt vers les régions supérieures.

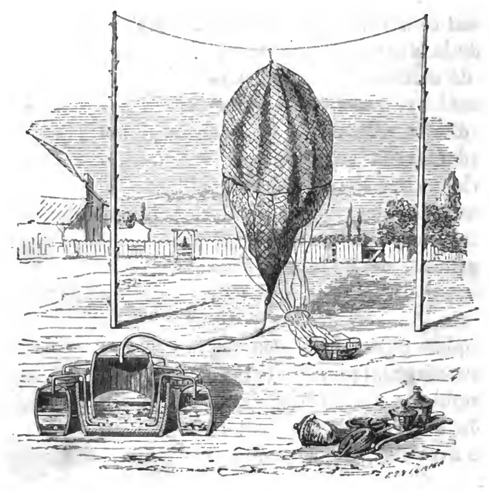


Fig. 141.

Lorsque l'aéronaute veut opérer sa descente, il ouvre la soupape dont nous avons parlé, le gaz s'échappe un peu, le ballon diminue de volume et descend. Si la chute est trop rapide, ou si l'aérostat se dirige vers un lieu où l'aéronaute ne pourrait descendre sans danger, il suffit de jeter un peu de lest et le ballon reprend son mouvement ascensionnel jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus d'un endroit où la descente puisse s'effectuer sans inconvénient.

153. **Parachutes.** — On voit attaché aux flancs du ballon de la figure 140 une espèce de grand parapluie en étoffe résistante appelé *parachute*. De son contour partent des cordes qui s'attachent à la nacelle. Si, par suite d'un accident, il devient urgent de se séparer du ballon, on coupe les cordes qui le réunissent à la nacelle, celle-ci tombe alors avec une grande rapidité; mais l'air qui s'engouffre sous le parachute le déploie et le mouvement se ralentit beaucoup (fig. 142).

## MÉLANGE DES GAZ.

154. Lorsqu'on verse dans un vase de l'eau et de l'acide sulfurique, malgré la différence des densités de ces deux corps, le mélange s'effectue, surtout si on agite un peu la masse, et subsiste après l'agitation. Pour le mercure et l'eau, il en est tout diffé-

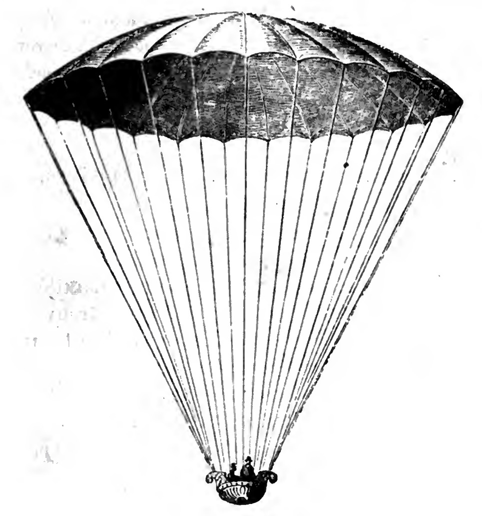


Fig. 142.

remment, et la séparation des deux liquides mélangés est immédiate. Il était intéressant d'examiner comment des gaz de densités différentes se comportaient lorsqu'ils étaient mis en présence l'un de l'autre. C'est ce que fit Berthollet[1]. Il plaça dans les caves de l'Observatoire, lieu calme et de température constante, un flacon B et un ballon A (fig. 143), disposés de manière que le col de l'un pût entrer exactement dans la tubulure de l'autre. B fut rempli d'acide carbonique et A d'hydrogène, et, quoique l'acide carbonique soit beaucoup plus dense que l'hydrogène et par suite

[1] Berthollet, chimiste célèbre, né en 1748, en Savoie, d'une famille française, mourut en 1822, membre de l'Académie des sciences. Il accompagna Bonaparte en Égypte.

doive tendre à rester dans le flacon inférieur B, il arriva bientôt que l'hydrogène et l'acide carbonique se trouvèrent uniformément répandus dans les deux vases.

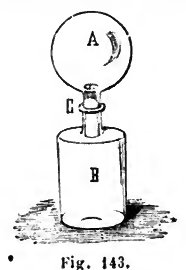


Fig. 143.

155. **Loi du mélange des gaz.** — Dalton [1] a posé vers 1805 la loi suivante : *La force élastique d'un mélange de plusieurs gaz est égale à la somme des forces élastiques de tous les gaz considérés chacun comme occupant le volume du mélange tout entier.*

## DISSOLUTION DES GAZ DANS LES LIQUIDES.

156. Lorsqu'on met un gaz ou un mélange de gaz en présence d'un liquide n'ayant même pas d'action chimique sur lui, le liquide peut absorber, dissoudre une certaine quantité du gaz ou du mélange gazeux. C'est ainsi que l'eau qui se trouve exposée à l'air dissout une certaine quantité des gaz qui se trouvent dans l'air, et la présence de ces gaz est même nécessaire : sans eux elle ne serait pas digérée facilement et produirait des nausées.

Pour prouver que l'eau tient des gaz en dissolution, il suffit de faire l'expérience suivante, qui repose sur ce fait que la solubilité des gaz décroît avec la température. On emplit exactement un ballon en verre (fig. 144) avec de l'eau ayant séjourné à l'air, on bouche le ballon avec un bouchon dans lequel passe un tube de dégagement, de manière qu'il ne reste pas une seule bulle d'air, que tout l'appareil, ballon et tube, soit rempli d'eau. On engage le tube sous une éprouvette reposant sur le mercure; on chauffe l'eau du ballon, et, au bout de peu de temps, les gaz se dégagent et se rendent dans l'éprouvette.

Les lois de la dissolution des gaz sont les suivantes :

1° *Les gaz ne se dissolvent pas tous en même proportion dans les liquides, même lorsqu'ils sont mis dans des conditions identiques ;*

2° *Les quantités d'un gaz dissoutes par l'unité de volume d'un*

[1] Dalton physicien anglais, né à Ingleshand en 1766, mort à Manchester en 1844.

*liquide sont proportionnelles à la pression que le gaz exerce à la surface du liquide ;*

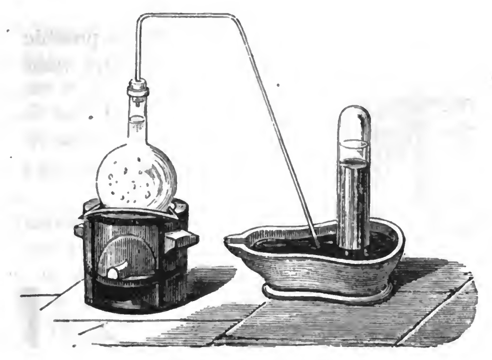


Fig. 144.

3° *Lorsqu'un mélange de plusieurs gaz est en présence d'un liquide, chacun d'eux se dissout comme s'il était seul.*

APPLICATIONS.

157. La fabrication des eaux gazeuses artificielles repose sur les principes précédents. Pour dissoudre le gaz acide carbonique dans l'eau, on le comprime, à l'aide d'une pompe de compression, dans un récipient contenant de l'eau ; cette eau chargée de gaz est ensuite transvasée dans des bouteilles ou dans des vases appelés siphons.

158. Dans l'industrie, les eaux gazeuses sont fabriquées avec des appareils dont la construction est assez variable. Nous décrirons sommairement celui qui est connu sous le nom d'appareil de Bramah perfectionné.

La pompe aspirante et foulante P (fig. 145) aspire le gaz dans le réservoir par le tube A. Le gaz se lave dans le flacon B, qui sert aussi de flacon témoin destiné à montrer la marche de l'opération; l'eau que l'on veut rendre gazeuse est en même temps aspirée par le tube T, qui plonge dans le réservoir V'. Le mélange de gaz et d'eau se fait dans la pompe

qui le refoule dans la sphère creuse et résistante R. Cette sphère est munie d'un manomètre et d'une soupape de pression.

Lorsqu'elle est remplie d'eau gazeuse, on procède à l'embouteillage, qui se fait ordinairement dans des vases appelés

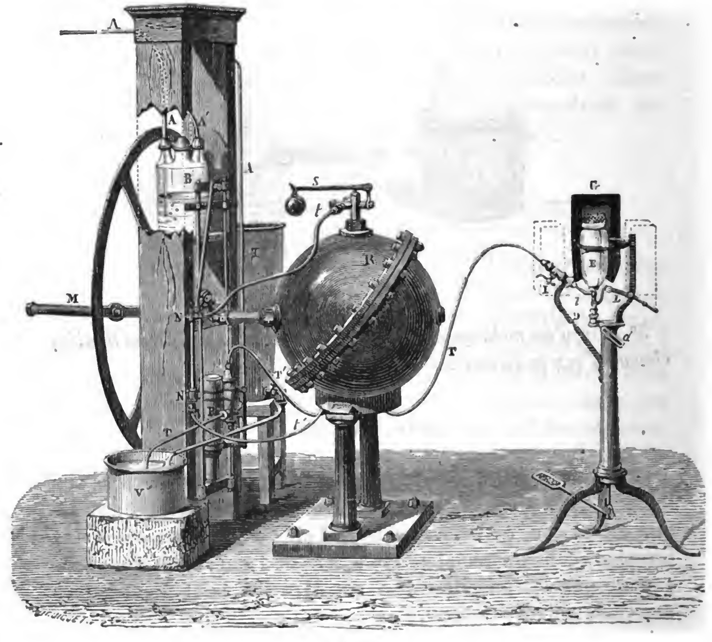



Fig. 145.

*siphons*. Ces siphons sont en verre épais et résistant et portent, à leur partie supérieure, une tubulure à laquelle on adapte un appareil de fermeture permanente en étain. Cette garniture en étain porte un tube plongeur *t* qui descend dans l'eau du siphon, et qui peut être fermé et mis en communication avec l'extérieur à l'aide d'une soupape B (fig. 146) que fait jouer le levier A.

Pour procéder à l'embouteillage, on renverse le siphon E

(fig. 145) qui est vide, et l'on introduit le bec *i* dans l'ajutage qui termine le tuyau T″ communiquant avec le réservoir. Il est d'ailleurs fixé sur un support et rendu fixe par le jeu d'une pédale que montre la figure. A l'aide du levier L, on soulève le levier du siphon, de manière à ouvrir celui-ci. Puis, se servant d'un robinet à deux voies I, on fait arriver l'eau gazeuse qui s'élève par le tube de verre que renferme le siphon. Quand il est rempli aux trois quarts, on ouvre dans un autre sens le robinet I, de manière à laisser échapper la plus grande partie du gaz libre qui se trouve dans le siphon, puis on achève le remplissage.

159. Quand on veut extraire l'eau de ce vase on appuie (fig. 146 et 147) sur le levier A du siphon ; la soupape B s'abaisse et met en communication l'espace M, où l'eau est poussée par la pression intérieure, avec le conduit C par lequel elle sort de l'appareil. Dès qu'on cesse d'appuyer sur le levier A, le ressort à boudin que montre la figure 146 ramène la soupape dans la position primitive et le liquide cesse de jaillir.

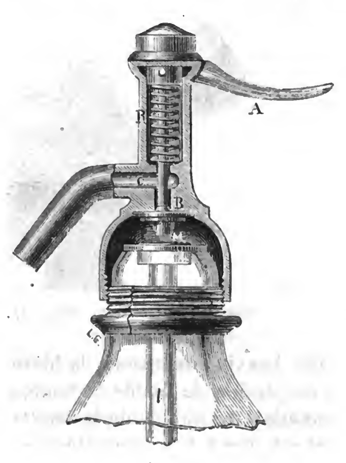


Fig. 146.

Au moment où le liquide sort, de nombreuses bulles gazeuses se dégagent au milieu de l'eau et montent à la partie supérieure. Ce dégagement continue encore quelque temps après qu'on a cessé d'extraire de l'eau du siphon. Cela provient de ce qu'au moment où le niveau du liquide baisse dans le siphon, le gaz acide carbonique, qui se trouve au-dessus de lui, se répand dans un plus grand volume; sa pression diminue et devient insuffisante pour maintenir dissous tout le gaz que renferme l'eau. Mais ces bulles gazeuses s'accumulant dans la partie supérieure du siphon, la pression augmente et devient suffisante pour

maintenir dissous le gaz que l'eau renferme encore. Aussi le dégagement diminue-t-il peu à peu et cesse-t-il même tout à fait, pour recommencer lorsqu'on ouvrira de nouveau le siphon.

Fig. 147.

160. Les vins mousseux, la bière, le cidre contiennent aussi en dissolution de l'acide carbonique, qui s'est formé par la fermentation du liquide de la bouteille. La mousse qu'ils produisent est due à leur viscosité qui s'oppose momentanément au dégagement du gaz.

# LIVRE DEUXIÈME

## CHALEUR

---

## CHAPITRE PREMIER

### DILATABILITÉ DES CORPS. — MESURE DES TEMPÉRATURES. THERMOMÈTRES.

161. Les sensations que nous éprouvons en présence des différents corps nous font dire que ces corps sont chauds ou froids selon les cas. C'est ainsi que nous éprouvons une sensation de chaleur en entrant, pendant l'hiver, dans un appartement chauffé, une sensation de froid en sortant de cet appartement au milieu de l'air extérieur. La cause de ces sensations est désignée en physique sous le nom de *chaleur* ou *calorique*. Nous admettrons que lorsqu'un corps nous semble froid, un morceau de marbre que nous touchons, par exemple, cette sensation est produite par la cession de chaleur que nous faisons à ce corps; que lorsqu'il nous semble chaud, c'est lui, au contraire, qui nous cède de la chaleur.

162. **Température.** — On désigne par le mot température l'état calorifique, variable avec le temps, mais déterminé à un moment donné, dans lequel se trouve un corps. On dit que deux corps sont à la même température, lorsque, mis en contact l'un avec l'autre, ils ne se cèdent point de chaleur. Lorsque l'un d'eux en cède à l'autre, il est dit à une température plus élevée que cet autre.

Il semble au premier abord que nous n'ayons besoin d'aucun

instrument pour mesurer les diverses températures et que nos sensations puissent nous servir à cet effet. Mais si nous réfléchissons que ces sensations sont purement relatives, qu'une cave dont la température est la même en été qu'en hiver nous semble froide pendant la première de ces deux saisons, chaude pendant la seconde, qu'il nous serait impossible de comparer d'une manière sûre les températures de deux corps ou de deux lieux à des intervalles de temps un peu considérables, nous reconnaîtrons bientôt la nécessité d'avoir un instrument spécial pour la détermination des températures.

Pour construire cet instrument, nous devons rechercher si la chaleur ne produit pas dans les corps des phénomènes ayant avec leur température une relation intime, phénomènes capables de servir à la mesure de cet élément. Parmi ces phénomènes, celui de la dilatation se prête parfaitement au but que nous poursuivons, et nous allons indiquer en quoi il consiste.

163. **Dilatabilité des corps par la chaleur.** — Lorsqu'un corps est placé dans un milieu dont la température est plus élevée ou plus basse que la sienne, il gagne ou perd de la chaleur jusqu'à ce qu'il ait pris la température de ce milieu. Cette variation dans l'état calorifique des corps est ordinairement accompagnée de changements dans leurs dimensions. Lorsqu'elles augmentent, on dit que le corps se *dilate;* lorsqu'elles diminuent, on dit qu'il se *contracte.*

164. **Dilatabilité des corps solides.** — Pour mettre en

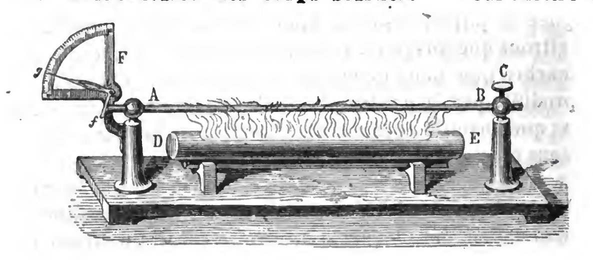



Fig. 148.

évidence la dilatation d'un corps solide suivant sa longueur, on se sert ordinairement du *pyromètre à cadran.*

Une tige métallique AB (fig. 148) en fer, par exemple, est por-

tée par deux petites colonnes dont elle traverse la partie supérieure. Une lampe à alcool DE est placée au-dessous d'elle sur la tablette en bois qui soutient l'appareil. L'extrémité postérieure B de la tige est fixée en C par une vis de pression ; l'extrémité antérieure vient s'appuyer en *f* contre la courte branche d'un levier coudé, dont la grande branche est formée par une aiguille capable de se mouvoir sur un cadran divisé F, au centre duquel est l'axe de rotation du levier. On dispose la tige de manière que lorsqu'elle est à la température ordinaire, son extrémité vienne toucher le levier et que l'aiguille se trouve au zéro de la graduation. On allume la lampe, la tige AB s'échauffe, s'allonge, et, comme elle est fixée en C, tout l'effet de la dilatation se porte sur l'extrémité A qui pousse la branche *f* et fait monter l'aiguille sur le cadran. Lorsqu'on éteint la lampe, la tige se refroidit, se contracte et revient à ses dimensions primitives, ce qui est mis en évidence par le retour de l'aiguille au zéro de la graduation.

Le même appareil peut aussi servir à montrer que les corps ne se dilatent pas tous également, car si on recommence l'expérience, en se servant d'une tige de cuivre, on constate que l'aiguille dans sa déviation maximum s'arrête en un autre point du cadran que lorsqu'elle était poussée par la dilatation de la tige de fer.

165. **Anneau de S'Gravesande.** — L'anneau de S'Gravesande permet de démontrer l'augmentation de volume des corps qui est désignée sous le nom de dilatation *cubique*, l'allongement suivant une dimension l'étant par le mot de dilatation *linéaire*. Un anneau métallique A (fig. 149) est fixé par une vis de pression sur une tige recourbée. A l'extrémité C de cette tige se trouve suspendue, à l'aide d'une chaîne, une boule métallique B. Le diamètre de la sphère est tel qu'à froid elle passe exactement à travers l'anneau. Dès qu'on la chauffe, elle se dilate, et il n'est plus possible de la faire passer à travers l'anneau.

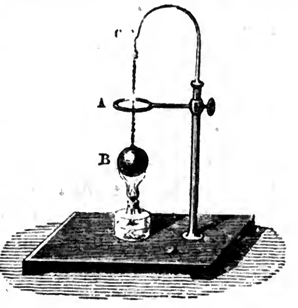


Fig. 149.

166. **Dilatabilité des liquides.** — La dilatabilité des liquides peut facilement se prouver à l'aide d'un ballon en verre A (fig. 150) muni d'un col étroit et long BDC; ce ballon contient un liquide, de l'alcool coloré, par exemple, qui s'élève jusqu'au point D. On plonge le ballon dans l'eau chaude, et on observe les faits suivants. Aussitôt après l'immersion, le niveau du liquide coloré descend au-dessous du point D, ce qui semblerait annoncer une contraction. Il n'en est rien cependant; l'abaissement du niveau provient de ce que la chaleur de l'eau agit d'abord sur le ballon et le fait dilater avant de produire le même effet sur le liquide qui, se trouvant alors dans un espace plus grand, doit baisser de niveau. Mais bientôt après la chaleur arrivant jusqu'à l'alcool le dilate, et il s'élève dans le tube bien au delà de son niveau primitif. Si, retirant le ballon de l'eau chaude, on le laisse refroidir et reprendre la température du commencement de l'expérience, le liquide se contracte et retombe au niveau D. Nous ferons remarquer que la quantité dont l'alcool s'est élevé ne représente que sa dilatation apparente, puisque le vase s'est dilaté en même temps que lui; pour avoir sa dilatation réelle, il faudrait augmenter la dilatation apparente de la dilatation de l'enveloppe.

Fig. 150.

L'expérience précédente nous prouve, par l'élévation de l'alcool dans le tube, que l'alcool se dilate plus que le verre. En général, les liquides se dilatent beaucoup plus que les solides dans les mêmes circonstances. Un vase, fût-il de bronze, étant rempli d'eau et bien bouché, crèverait infailliblement par la dilatation de l'eau, si on l'exposait à une forte chaleur.

167. **Dilatabilité des gaz.** — On peut aussi rendre sensibles les effets de la dilatation et de la contraction des corps gazeux. Ces corps se dilatent beaucoup plus encore que les liquides sous l'influence de la même élévation de température. Prenons (fig. 151) un ballon A auquel on a soudé un tube deux fois recourbé BCDE et terminé en E par un entonnoir. Versons en E un peu de liquide coloré, il tombe dans le tube jusqu'à ce que l'air qui se trouve au-dessous de lui ait acquis par la compression une force

élastique capable de faire équilibre à son poids et à la pression atmosphérique. Supposons qu'il s'arrête en D : dès qu'on approchera le ballon A du feu ou qu'on lui communiquera la chaleur de la main en le touchant, la dilatation de l'air qu'il renferme sera telle qu'on verra le petit index monter dans le tube : dès qu'on laissera refroidir l'appareil, l'index redescendra. Cette expérience nous prouve que l'air se dilate sous l'action de la chaleur et se contracte par le refroidissement.

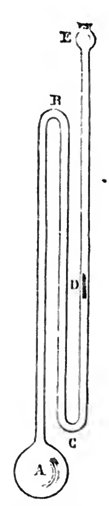


Fig 151.

168. **Thermomètre.** — La propriété que possèdent tous les corps de se dilater sous l'influence de la chaleur et de reprendre les mêmes dimensions quand cette influence a cessé, offre un moyen très-simple pour mesurer les températures. On l'applique dans l'usage des thermomètres.

Nous avons vu que lorsque deux corps inégalement chauds sont mis en contact, le plus chaud se refroidit et se contracte, le plus froid s'échauffe et se dilate; et cela jusqu'à ce que tous deux aient atteint la même température. Il est évident dès lors que, pour comparer la température des différents corps, nous pourrons observer les volumes qu'un même corps mis en contact avec eux prendra successivement. Ce corps sera appelé *thermomètre*. Il faut remarquer que le thermomètre, pour mesurer exactement la température d'un corps, doit avoir des dimensions beaucoup plus petites que lui, de telle sorte que la chaleur cédée ou gagnée par le thermomètre ne fasse pas varier sensiblement la température du corps sur lequel on opère. On conçoit, en effet, que si dans un litre d'eau bouillante on plonge un thermomètre dont le volume soit égal à un demi-litre, la quantité de chaleur que l'eau devra céder au thermomètre sera relativement assez grande pour que, lorsque l'équilibre de température sera atteint, le liquide se soit refroidi beaucoup et que le volume du thermomètre mesure non plus la température du commencement de l'expérience, mais celle qui existe finalement. Si au contraire le thermomètre est petit, la quantité de chaleur dont il aura besoin pour être en équi-

libre avec l'eau sera relativement faible et la température de celle-ci ne variera guère.

Tous les corps pourraient à la rigueur être employés à la construction des thermomètres, puisque tous se dilatent sous l'action de la chaleur et se contractent par le refroidissement. Mais pour rendre l'instrument exact et commode, il est besoin de faire un choix parmi eux. Si on emploie un corps solide, ses variations de volume seront trop petites et l'appareil ne sera pas sensible. Il est vrai, qu'on pourrait, par une disposition spéciale, comme dans le pyromètre à cadran, par exemple, amplifier leur dilatation de manière qu'elle puisse être plus facilement observée. Mais l'instrument perdrait alors en simplicité et deviendrait d'un usage moins commode. D'ailleurs les solides offrent un autre inconvénient. On a remarqué que lorsque ces corps sont soumis à de fréquentes alternatives de dilatation et de contraction, leur structure se trouve modifiée ainsi que les lois de leur dilatabilité. Un thermomètre construit avec un corps solide, comme une barre métallique, n'est donc pas un instrument qui reste identique et comparable à lui-même à des époques différentes. Ce seul motif suffirait pour faire rejeter l'emploi des solides dans la construction des thermomètres.

Si, au contraire, on emploie un gaz, son volume dépendra à la fois de la température et de la pression, et chaque fois qu'on consultera le thermomètre il faudra consulter en même temps le baromètre pour pouvoir faire les corrections indiquées, ce qui dans la pratique est incommode. Il faut, du reste, ajouter que ce sont les gaz qui sont les plus aptes à accuser de faibles variations de température, que les thermomètres à gaz offrent l'avantage d'être rigoureusement comparables; cela tient à ce que leur dilatation est environ cent quarante fois plus grande que celle du verre, et que, par suite, les variations de dilatabilité provenant de la différence des verres employés pour renfermer ces gaz n'ont pas d'influence sensible sur les indications de l'instrument.

Les variations de volume des liquides, plus grandes que celles des solides, ne dépendant pas de la pression extérieure comme celles des gaz, offrent un moyen terme exempt des inconvénients que nous venons de signaler; c'est donc parmi eux que nous devons rechercher la substance avec laquelle nous construirons les thermomètres.

Le mercure est celui qui atteint le mieux le but proposé. Il supporte, en effet, avant de bouillir, plus de chaleur que la plupart des autres liquides ; il peut résister sans se congeler à des froids qui solidifient presque tous les liquides, à l'exception de certaines liqueurs spiritueuses, l'esprit de vin, l'éther, etc. Enfin il a l'avantage d'être plus sensible à l'action de la chaleur et d'offrir des dilatations parfaitement régulières.

169. **Thermomètre à mercure. Sa construction.** — Le thermomètre à mercure se compose d'un tube de verre capillaire à l'extrémité duquel a été soudé un réservoir cylindrique ou sphérique. Ce réservoir et une portion du tube contiennent du mercure. Une graduation placée sur le tube lui-même, ou sur une planchette contre laquelle il est fixé, sert à apprécier les dilatations du mercure.

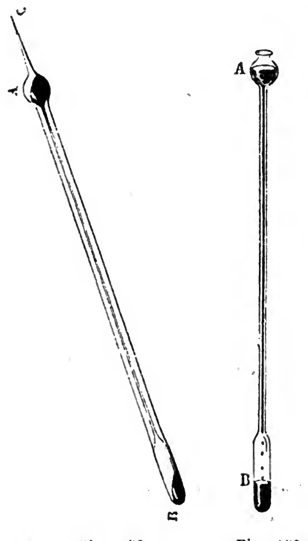


Fig. 152. Fig. 153.

Pour construire un thermomètre à mercure, on commence par choisir un tube capillaire bien calibré, c'est-à-dire ayant le même diamètre intérieur dans toute sa longueur. On y soude un réservoir cylindrique ou sphérique B (fig. 152 et 153), à l'autre extrémité un second réservoir A un peu plus grand que le premier et qu'on remplit de mercure pur et distillé. Quand le réservoir A a une large ouverture, comme dans la figure 153, rien n'est plus facile ; mais lorsqu'il se termine par une pointe effilée, comme dans la figure 152, il faut plonger l'extrémité du tube dans un bain de mercure V (fig. 154) et chauffer ensuite l'ampoule avec une lampe à alcool. L'air intérieur se dilate et s'échappe en partie par bulles à travers le mercure. Si on retire la lampe à

alcool, l'air se contracte en se refroidissant, laisse le vide au-dessous de lui, et la pression atmosphérique qui s'exerce sur le bain de mercure fait monter le liquide dans le thermomètre et l'ampoule A se remplit. Lorsque cette première opération est faite, on remet alors l'instrument dans la position verticale; mais le tube étant capillaire, l'air ne peut facilement s'échapper, et à mesure que le mercure descend dans le tube, la force élastique de l'air qui se trouve au-dessous augmente; elle peut devenir assez grande pour soutenir le liquide et l'empêcher de descendre. On incline alors de nouveau l'appareil comme le représente la figure 154; on chauffe le réservoir B et la tige avec la lampe à alcool : une nouvelle quantité d'air s'échappe

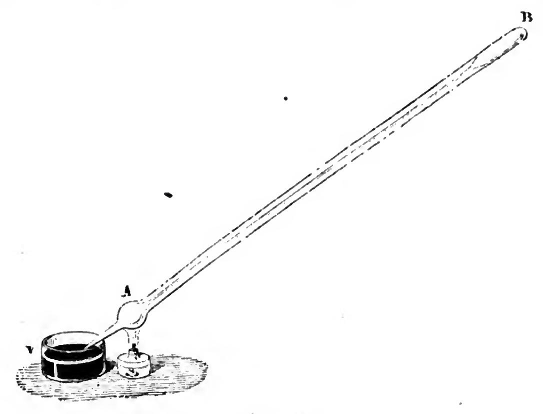



Fig. 154.

et se trouve, lors du refroidissement, remplacée par une nouvelle quantité de mercure. Il faut deux ou trois opérations de ce genre pour remplir le thermomètre. Pour chasser les dernières bulles, on place l'instrument sur une grille inclinée semblable à celle que nous avons employée dans la construction du baromètre; on fait bouillir le mercure dont la vapeur chasse l'air restant dans le tube, et, les vapeurs mercurielles se condensant par le refroidissement, l'appareil se remplit entièrement de mercure.

Il faut maintenant régler la course du thermomètre, c'est-à-

dire laisser dans l'intérieur du tube une quantité de mercure telle qu'aux plus basses températures pour lesquelles on veut employer l'instrument, le liquide ne rentre pas dans le réservoir, et qu'aux plus hautes il reste un peu au-dessous de l'extrémité de la tige. Pour cela, on comprend qu'il suffit de porter l'appareil à des températures un peu plus basses et un peu plus élevées que les températures extrêmes qu'il doit plus tard indiquer et s'assurer par tâtonnement que, dans ces conditions, le mercure ne rentre pas dans le réservoir et ne sort pas de la tige.

Lorsque la course du thermomètre est réglée, on le ferme à la lampe. On peut y laisser de l'air ou l'en purger. Il vaut cependant mieux l'en purger, non que cet air puisse s'opposer à la dilatation qui se fait avec une force irrésistible, mais de peur qu'en agitant le thermomètre, quelques petites bulles d'air ne s'introduisent dans la colonne et n'en interrompent la continuité. Pour chasser l'air, on chauffe de nouveau le tube jusqu'à ce que le mercure arrive au sommet de la tige, et on en fond l'extrémité dans le dard du chalumeau.

170. **Détermination des points fixes. Graduation du thermomètre.** — Pour que le thermomètre puisse servir à comparer les températures entre elles, il faut que cet instrument soit gradué et que sa graduation repose sur des phénomènes qui se produisent toujours à la même température. La fusion de la glace et l'ébullition de l'eau sont deux phénomènes qui satisfont à cette condition, et ce sont eux que les physiciens ont choisis pour servir à déterminer les points fixes du thermomètre.

On se procure de la glace pilée, on la laisse séjourner pendant quelque temps dans un appartement où la température soit douce, et lorsqu'une certaine quantité de cette glace s'est fondue, on met le reste dans un vase percé de trous (fig. 135), et on enfonce au milieu le thermomètre à graduer, de manière que tout le mercure soit couvert par la glace. On soulève de temps en temps l'instrument pour observer le niveau du mercure; quand ce niveau est devenu stationnaire, on marque sa position sur la tige, soit avec un pinceau, soit en faisant un trait au diamant. Ce sera le *zéro* de notre échelle.

Pour déterminer le second point fixe, il faut s'entourer de précautions spéciales. Il est, en effet (comme nous le verrons au

chapitre v), plusieurs circonstances qui influent sur la température de l'ébullition de l'eau : la nature du vase qui la renferme, la pression qui s'exerce sur la surface, l'impureté plus ou moins grande du liquide; enfin la température croît depuis la surface jusqu'au fond.

Toutes ces causes de variations rendraient incertaine la détermination du second point fixe, si Rudberg n'avait montré qu'on peut annuler la plupart d'entre elles, en plongeant le thermomètre non dans l'eau bouillante, mais dans la vapeur qui s'en échappe : il n'est plus besoin alors d'employer de l'eau pure, de se préoccuper de la nature du vase ni de la profondeur du liquide.

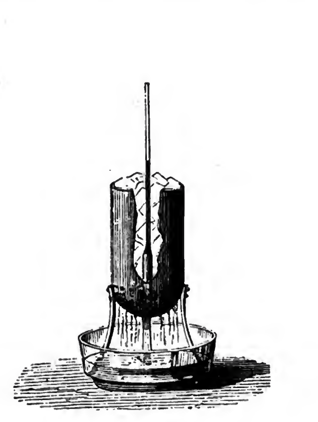


Fig. 155.

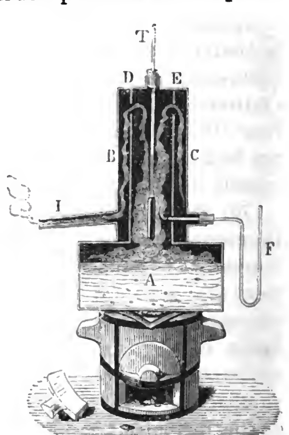


Fig. 156.

On emploie pour cette opération une étuve à vapeur que représente la figure 156. Un vase en fer-blanc A contient de l'eau ; sur sa base supérieure est pratiquée une ouverture qui porte un manchon circulaire au milieu duquel est suspendu le thermomètre T. Ce manchon communique avec une enveloppe annulaire BCDE, qui présente deux tubulures sur ses parois latérales. L'appareil étant placé sur un fourneau, l'eau entre en ébullition, la vapeur monte dans le manchon central, entoure le thermomètre et s'échappe par la tubulure I, après avoir circulé dans l'enveloppe annulaire. La couche de vapeur que

contient cette enveloppe a pour effet d'empêcher l'air extérieur de refroidir la vapeur qui se trouve en contact avec le thermomètre. Dans la seconde tubulure se trouve placé un manomètre à air libre F, qui permet de vérifier si la pression est la même dans l'appareil qu'à l'extérieur. Le mercure se dilate et finit par s'arrêter à un niveau fixe que l'on marque par un nouveau trait vis à-vis duquel on inscrit 100. L'intervalle entre les points 0 et 100 est divisé en cent parties égales, et chaque division correspond à un degré. La division est prolongée au-dessus du point 100 et au-dessous du point 0.

171. On ne doit toutefois marquer 100 que si la pression de l'atmosphère est de $760^{mm}$; sans quoi il y a une correction à faire. On a remarqué que la température de la vapeur d'eau s'élève ou s'abaisse d'un degré, quand la pression augmente ou diminue de $27^{mm}$. Si la pression est de $787^{mm}$, c'est-à-dire 760 plus 27, on devra marquer 101 au point fixe ; si elle est de 733, c'est-à-dire 760 moins 27, on devra marquer 99 ; si elle est de 778, c'est-à-dire 760 plus 18, on devra marquer 100 plus $\frac{1}{27}$ de 18 ou 100 plus $\frac{2}{3}$. Si la pression est de $751^{mm}$, ou 760 moins 9, on devra marquer 100 moins $\frac{1}{27}$ de 9 ou 100 moins $\frac{1}{3}$, c'est-à-dire 99 plus $\frac{2}{3}$.

172. **Unité de température.** — On voit par le mode de graduation employé que l'unité de température est le degré centigrade. C'est l'accroissement de température capable de faire dilater dans un vase de verre une masse de mercure de la centième partie de la dilatation apparente qu'elle subit, quand on la fait passer de la température de la glace fondante à la température de la vapeur d'eau bouillante sous la pression de $760^{mm}$.

173. **Diverses échelles thermométriques.** — L'échelle connue sous le nom d'échelle *Réaumur*[1] diffère de l'échelle ordinaire, en ce que l'on marque 80 au point de l'ébullition de l'eau.

Il est facile de trouver la règle à appliquer pour transformer les indications Réaumur en indications centigrades et réciproquement.

En effet, puisque 100° centigrades valent 80° Réaumur, un seul degré centigrade vaudra les $\frac{80}{100}$ d'un degré Réaumur, ou les $\frac{4}{5}$, et réciproquement un degré Réaumur, vaudra les $\frac{5}{4}$ d'un

[1] Réaumur, physicien et naturaliste, né à la Rochelle en 1683, mort en 1757.

degré centigrade. Par suite, si l'on veut savoir à combien de degrés Réaumur correspondent par exemple 25° centigrades, on prendra les $\frac{4}{5}$ de 25°, ce qui donne 20°. De même, si on veut savoir à combien de degrés centigrades correspondent 20° Réaumur, on prendra les $\frac{5}{4}$ de 20°, ce qui donne 25°.

En Angleterre, on se sert souvent de l'échelle de Fahrenheit. Le point de l'ébullition correspond à 212° centigrades, et celui de la glace fondante à 32°; il y a donc entre ces deux points 212 moins 32 degrés ou 180°.

Donc 180 divisions Fahrenheit valant 100° centigrades, une seule vaudra $\frac{100}{180}$ ou $\frac{5}{9}$ de degré centigrade, et inversement un degré centigrade vaudra les $\frac{9}{5}$ d'un degré Fahrenheit.

Donc, quand on voudra transformer des degrés centigrades en degrés Fahrenheit, il faudra prendre les $\frac{9}{5}$ de la température indiquée, ce qui donne le nombre des divisions à partir de 0 de l'échelle centigrade; mais comme le 0 de Fahrenheit est à 32° au-dessous, il faudra ajouter 32°.

Ainsi, soit à transformer 45 degrés centigrades en degrés Fahrenheit, il faut en prendre les $\frac{9}{5}$ de 45, ce qui donne 81, et ajouter 32, ce qui donne 113.

Inversement, pour transformer des degrés Fahrenheit en degrés centigrades, il faudra retrancher 32 et prendre les $\frac{5}{9}$.

Ainsi, soit à transformer 68 degrés Fahrenheit en degrés centigrades, 68 moins 32 donne 36, et en prenant les $\frac{5}{9}$ de 36, on a 20°.

**174. Thermomètre à alcool.** — Lorsqu'on veut apprécier de très-basses températures, comme le mercure se congèle à 40° au-dessous de zéro, on est obligé de renoncer à l'emploi du thermomètre à mercure. On se sert alors du thermomètre à alcool, l'alcool n'ayant pu être congelé aux températures les plus basses que l'on ait produites. Sa construction est un peu plus simple que celle que nous avons décrite précédemment. Il n'est pas nécessaire de souder une ampoule à la partie supérieure de la tige : on chauffe seulement le réservoir pour en dilater l'air, et on plonge l'extrémité de la tige dans l'alcool absolu (privé d'eau) et coloré en rouge par de la teinture d'orseille. Par suite du refroidissement, le liquide monte dans le tube; lorsqu'une certaine quantité y a été introduite, on retourne l'instrument et on le chauffe de manière à faire bouillir l'alcool dont les vapeurs chassent le reste de l'air. L'ébullition de ce liquide se faisant environ à 78° de l'é-

chelle centigrade, on n'est pas obligé de chauffer autant que pour le mercure, et il en résulte que l'on peut sans inconvénient plonger de nouveau l'appareil dans l'alcool froid sans que le verre se brise. Le refroidissement amène la condensation des vapeurs alcooliques, et le tube se remplit tout à fait. On le ferme alors à la lampe.

Le zéro du thermomètre à alcool se détermine de la même manière que celui du thermomètre à mercure. Quant à l'autre point fixe, il est évident qu'on ne peut prendre l'ébullition de l'eau pour le déterminer, puisque l'alcool bouillant à une température plus basse donnerait alors des vapeurs dont la force élastique pourrait briser le thermomètre. On détermine alors un autre degré de l'échelle en plongeant le thermomètre dans un liquide dont la température est donnée par un thermomètre à mercure *étalon*, et on partage l'intervalle en autant de divisions qu'il y a d'unités dans la température indiquée par le thermomètre à mercure.

Cet instrument sert surtout pour observer les basses températures. Dans les températures un peu élevées, ses indications sont beaucoup moins exactes que celles du thermomètre à mercure.

**175. Thermomètres à maxima et à minima de Ruterford.** — Il est important d'avoir un thermomètre qui puisse indiquer le mininum et le maximum de la température en un lieu donné et dans un intervalle de temps connu, sans que l'observateur soit obligé de rester auprès de l'instrument et de suivre ses indications pendant tout ce temps.

Ruterford a construit des thermomètres qui atteignent ce but.

Le thermomètre à maxima est un thermomètre à mercure ordinaire AB (fig. 157), gradué comme les autres, mais horizontal

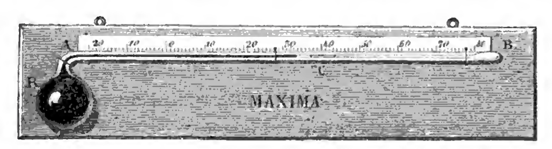



Fig. 157.

et contenant dans sa tige en C un index formé par un petit cylindre en fer. Quand la température s'élève, le petit index est poussé par le mercure. Quand elle s'abaisse, le mercure se contracte, et, comme il ne mouille pas le fer, se retire sans entraîner le petit

index qu'il abandonne à l'endroit où il a été poussé au moment du maximum.

Le thermomètre à minima est un thermomètre à alcool AB

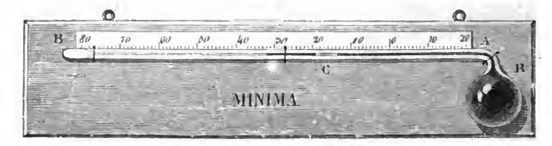



Fig. 158.

(fig. 158) contenant un petit index en émail C. Si la température croît, l'alcool glisse autour de l'index sans le déplacer; si elle s'abaisse, l'alcool se contracte, et dès que le sommet de la colonne atteint l'index, il l'entraîne avec lui pour le mener au point où correspond la température la plus basse et l'y laisser lorsque le liquide se dilatera sous l'influence d'une nouvelle élévation de température.

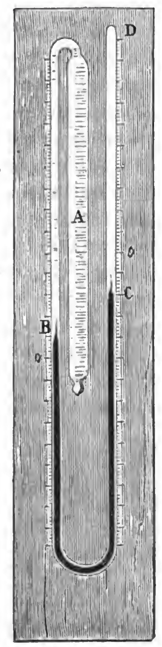



Fig. 159.

176. **Thermométrographe de Six et Bellani.** — Le thermométrographe de Six et Bellani a sur les thermomètres précédents l'avantage d'indiquer à la fois le maximum et le minimum de la température. Il se compose d'un réservoir A (fig. 159) plein d'alcool, auquel est soudé un tube recourbé BCD. Ce tube contient de l'alcool depuis le réservoir jusqu'en B, de B en C du mercure, et de C en D de l'alcool surmonté d'une couche d'air; la colonne de mercure chasse devant elle des index en émail renfermant un petit cylindre de fer doux.

Avant la mise en expérience, les index sont amenés par un aimant au contact avec le mercure. Lorsque la température baisse, l'alcool du réservoir se contracte, le mercure le suit et pousse l'index de gauche vers le réservoir dans la branche B; lorsqu'elle s'élève, l'alcool se dilate, et

tandis que l'index de gauche reste où il a été amené, celui de droite est poussé dans la branche CD, de telle sorte que la graduation faite par comparaison avec un thermomètre à mercure indique le maximum sur la branche CD et le minimum sur la branche B.

177. **Pyromètre de Brongniart.** — Quand on veut apprécier des températures très-élevées, celles des fours à porcelaine, par exemple, il n'est plus possible d'employer les thermomètres à alcool et à mercure ; on se sert alors des pyromètres de Brongniart et de Wegwood. Le pyromètre de Brongniart ressemble beaucoup au pyromètre à cadran. Son usage repose sur la dilata-

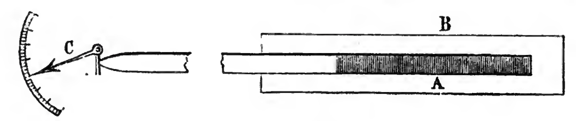



Fig. 160.

tion d'une barre d'argent A (fig. 160) enfermée dans une rainure creusée au milieu d'un bloc B en porcelaine, substance peu dilatable par rapport à l'argent; la barre d'argent agit sur le levier coudé d'une aiguille capable de se mouvoir sur un cadran par l'intermédiaire d'une barre en porcelaine. La barre et la masse de porcelaine sont placées dans le four dont on veut évaluer approximativement la température. La barre de porcelaine sort du four et agit sur le levier coudé.

178. **Pyromètre de Wegwood.** — Le pyromètre de Wegwood est fondé sur la contraction qu'éprouve l'argile chauffée à une température élevée. Cette contraction est causée par un changement dans la nature chimique de cette substance. Deux règles métalliques A, A' (fig. 161), faisant entre elles un petit angle,

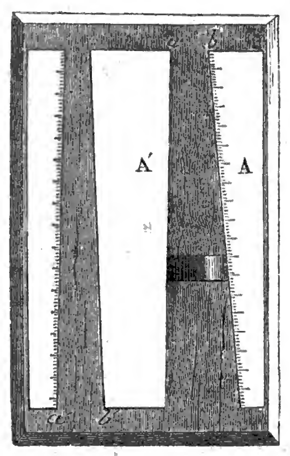



Fig. 161.

sont disposées sur une tablette également métallique. Cet angle peut recevoir de petits cylindres d'argile qui y pénétreront d'autant plus loin qu'ils se seront contractés davantage. Les petits cylindres d'argile sont placés dans le four, et lorsqu'ils en ont pris la température, on les laisse refroidir et on les fait glisser dans les coulisses que laissent entre elles les règles A, A'. La quantité dont ils s'enfoncent permet d'apprécier la température. Pour éviter de donner à l'appareil de trop grandes dimensions, au lieu d'une seule coulisse, on en dispose quelquefois deux sur la même tablette; mais la seconde n'est que la continuation de la première.

---

# CHAPITRE II

## APPLICATIONS DE LA DILATATION DES CORPS.

179. **Dilatation des solides.** — Lorsqu'on chauffe des barres faites avec des substances différentes, des barres de zinc, de fer et d'argent, par exemple, on observe que, pour une élévation de température d'un même nombre de degrés, l'allongement n'est pas le même pour toutes. Il était important pour la science et pour l'industrie de pouvoir apprécier la dilatabilité des différents corps. Aussi les physiciens, par une série d'observations dans l'étude desquelles nous n'entrerons pas, ont-ils déterminé des nombres qui permettent d'apprécier la dilatabilité respective des corps. Ces nombres sont appelés *coefficients de dilatation*. Ils peuvent être définis comme il suit.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* d'un corps le nombre qui exprime l'allongement de l'unité de longueur de ce corps pour une élévation de température d'un degré.

Ainsi, par exemple, le coefficient de dilatation linéaire du fer est de 0,000012350, cela veut dire qu'une barre de fer de $1^{m}$ se dilaterait pour une élévation de température de 1° de $0^{m},000012350$. On admet que pour 10°, elle se dilaterait dix fois plus, c'est-à-

dire 0$^{m}$,00012350, pour 15° de quinze fois plus, c'est-à-dire 0$^{m}$,000012350 multiplié par 15, ou 0$^{m}$,000183250.

On appelle *coefficient de dilatation superficielle* d'un corps le nombre qui exprime l'augmentation de l'unité de surface pour une élévation d'un degré.

Enfin on appelle *coefficient de dilatation cubique* le nombre qui exprime l'augmentation de l'unité de volume pour une élévation de température d'un degré.

Il n'est pas nécessaire, pour résoudre les questions relatives à la dilatation des corps, de connaître ces trois coefficients ; il suffit d'en connaître un, car on démontre que le coefficient de dilatation superficielle est le double du coefficient de dilatation linéaire, et que le coefficient de dilatation cubique est le triple du coefficient de dilatation linéaire.

Nous citerons comme application de l'usage qu'on peut faire des coefficients de dilatation l'exemple suivant :

Les rails d'un chemin de fer sont placés bout à bout sur leurs traverses avec un petit intervalle entre chaque rail et le suivant, pour permettre au fer de se dilater librement au moment des élévations de température. L'ingénieur qui les fait disposer a évidemment besoin de connaître une fois pour toutes la dilatation dont ils sont susceptibles pour indiquer aux ouvriers l'intervalle qu'ils devront laisser entre deux rails consécutifs. Supposons que leur longueur à la température où on les pose soit 2$^{m}$,50, et que la température puisse s'élever de 25°, le coefficient de dilatation du fer étant 0,000012350, 1$^{m}$ de rail pour une variation de 25° se dilate de 0$^{m}$,000012350 multiplié par 25, c'est-à-dire 0,000308750, et 2$^{m}$,50 se dilateront d'une quantité égale à la dilatation de 1$^{m}$ multiplié par 2$^{m}$,50, c'est-à-dire de 0$^{m}$,000308750 multiplié par 2$^{m}$,50, ou 0$^{m}$,000771875.

TABLEAU DE LA DILATATION LINÉAIRE DE QUELQUES CORPS SOLIDES.

| | Coefficients. |
|---|---|
| Flint-glass anglais | 0,000008116 |
| Verre de France avec plomb | 0,000008719 |
| Verre de Saint-Gobain | 0,000008908 |
| Acier non trempé | 0,001010792 |
| Acier trempé | 0,000012395 |
| Fer forgé | 0,000012204 |
| Fer passé à la filière | 0,000012350 |

| | Coefficients. |
|---|---|
| Cuivre rouge | 0,000017000 |
| Cuivre jaune | 0,000018750 |
| Argent | 0,000019086 |
| Étain | 0,000019576 |
| Plomb | 0,000028483 |
| Zinc | 0,000029416 |

180. Les tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux éprouvent des variations de longueur par les changements de température. Si les tuyaux étaient fixés à leurs extrémités, la force avec laquelle ils se dilatent ou se contractent amènerait infailliblement des ruptures ou des déformations. Pour éviter cet inconvénient, on emboîte les cylindres les uns dans les autres, en laissant le jeu nécessaire pour permettre les dilatations ou les contractions.

C'est pour la même raison que les tuyaux de poêle sont disposés d'une manière analogue ; que les zingueurs, au lieu de clouer sur toute leur étendue les feuilles de zinc dont ils recouvrent les toits, les fixent seulement en quelques points et disposent les bords de ces feuilles de manière qu'ils se recouvrent.

181. Pour garnir les roues des voitures des cercles en fer qui maintiennent unies entre elles toutes les pièces, on fait un cercle d'un diamètre plus petit que celui de la roue en bois, on le chauffe, et lorsque la chaleur l'a suffisamment dilaté, on en entoure la roue de bois. Le cercle de fer, en se refroidissant, se contracte et serre la roue avec une grande force.

182. Il arrive souvent qu'un bouchon tienne trop fortement dans le goulot d'un flacon pour qu'on puisse déboucher celui-ci. On chauffe alors le goulot en le tournant dans la flamme d'une lampe à alcool ; il se dilate avant le bouchon, devient plus large que lui, et le flacon peut alors être facilement débouché.

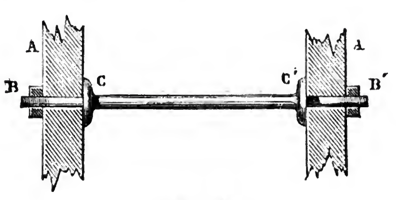


Fig. 162.

183. Supposons qu'entre deux murs verticaux A et A' (fig. 162), on ait fixé pour les soutenir une barre de fer maintenue par des talons B, C, B', C' ; si l'on n'a pas eu soin de laisser entre les talons et les murs un intervalle suffisant, la barre, en se dilatant, poussera les deux murailles en dehors ; en se contractant,

elle tendra à les rapprocher l'une de l'autre. Ce phénomène souvent répété nuirait infailliblement à la solidité de l'édifice.

M. Molard, ancien directeur du Conservatoire des arts et métiers, a fait de ce qui précède une heureuse application. Deux murs d'une galerie s'étaient déviés de leur aplomb et se renversaient en dehors. M. Molard les fit relier par des barres de fer qu'il porta à la température rouge; pendant qu'elles étaient à cette température, il fit serrer fortement en dehors des écrous semblables à ceux que l'on voit en B, B' sur la figure 162, puis laissa refroidir les barres, qui, en se contractant, ramenèrent les murs dans la verticale.

184. **Pendules compensateurs.** — Nous avons vu, en étudiant le pendule, que la durée de ses oscillations varie avec sa longueur. Il suit de là que les variations de température devront amener des variations dans la durée des oscillations, qui deviendra plus grande lorsque le pendule se dilatera, plus courte lorsqu'il se contractera. Il suit de là aussi que les horloges qui sont réglées par un pendule retarderont en été et avanceront en hiver. Pour les mettre à l'abri de l'influence de la température, on se sert de pendules dont la longueur ne varie pas, et qu'on appelle pour cette raison pendules *compensateurs* ou *compensés*.

Nous ne citerons que celui de Julien Leroy[1]. La lentille L et la tige qui la soutient (fig. 163) sont reliées au couteau de suspension par des châssis formés de barres de fer F, F'' et de cuivre C, C'. Lorsque la température s'élève, la longueur des tiges AE, A'E croît et tend à augmenter celle du pendule; mais en même temps celle des tiges BC, B'C' croît aussi, et comme elles sont fixées par leur partie inférieure, elles ne peuvent se dilater que de bas en haut, et par conséquent tendre à relever la tige F'. On voit que la dilatation des barres de fer tend à augmenter la distance entre le centre de la lentille L et le couteau de suspension, tandis que la dilatation des barres de cuivre tend à diminuer cette distance. On comprend donc qu'en connaissant les coefficients de dilatation du fer et du cuivre, on puisse arriver à disposer le pendule de manière que sa longueur soit invariable.

Le calcul montre qu'un seul châssis ne saurait être suffisant pour cette compensation.

[1] Julien Leroy, né à Tours, en 1685, mort en 1759.

La figure 164 représente la disposition employée.

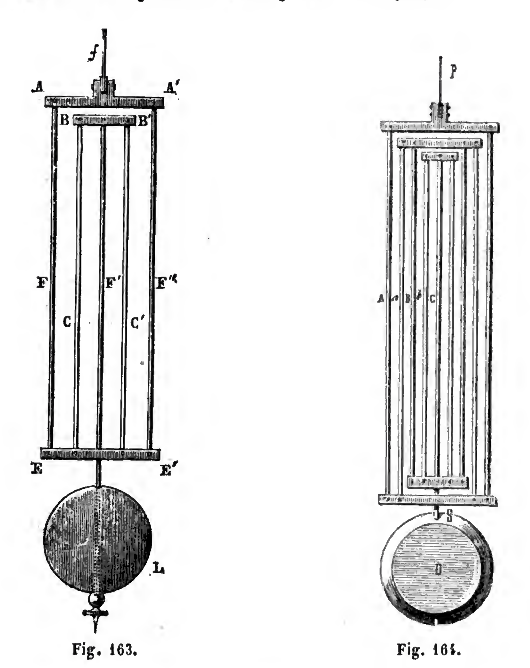



Fig. 163. Fig. 164.

185. **Dilatation des liquides.** — Les liquides n'ayant par eux-mêmes aucune forme déterminée, il n'y avait lieu pour les physiciens que de s'occuper de leur dilatation cubique.

En étudiant la dilatation des liquides, on a constaté qu'elle était loin d'être aussi régulière que celle des solides, que le mercure seul se dilatait avec régularité. Son coefficient de dilatation ablue est $\frac{1}{5550}$, celui de dilatation apparente $\frac{1}{6480}$.

186. **Maximum de densité de l'eau.** — La dilatation de l'eau a été l'objet d'études particulières.

En général, lorsqu'un corps se contracte par le refroidissement, sa densité augmente, puisque l'unité de volume du corps contracté contient un nombre de molécules plus grand et par suite pèse plus qu'avant sa contraction. Inversement, lorsqu'un corps

s'échauffe et se dilate, sa densité diminue. L'eau et quelques dissolutions salines font exception à cette loi générale.

Lorsqu'on refroidit simultanément un thermomètre à mercure et un thermomètre fait avec de l'eau, on constate d'abord que le liquide baisse à la fois dans les deux instruments ; mais, lorsque la température est voisine de 4°, le niveau de l'eau s'arrête et remonte ensuite, tandis que celui du mercure continue à s'abaisser avec la température. Il y a donc aux environs de 4° une température pour laquelle le volume d'un poids donné d'eau est le plus petit possible, et où, par conséquent, la densité du liquide est la plus grande possible.

Despretz[1], par des expériences que nous ne décrirons pas, a déterminé la température exacte de ce maximum ; il a trouvé qu'elle était de 4°. Il a aussi constaté l'existence d'un maximum de densité pour un grand nombre de dissolutions salines.

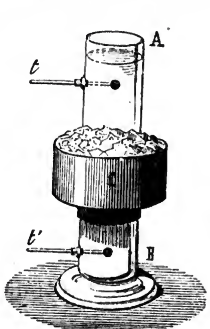


Fig. 165.

Dans les cours, pour mettre en évidence le maximum de densité de l'eau, on se sert de l'appareil suivant. Il consiste en une éprouvette AB renfermant de l'eau (fig. 165), dans l'intérieur de laquelle pénètrent deux thermomètres *t* et *t'*. Un manchon de cuivre C enveloppe la région moyenne de l'éprouvette et peut recevoir de la glace. L'eau de l'éprouvette se refroidit par l'influence de la glace, et les deux thermomètres indiquent un abaissement de température ; le thermomètre *t'* baisse beaucoup plus vite que le thermomètre *t*, parce que les couches d'eau, en se refroidissant, acquièrent une densité plus grande et gagnent le fond de l'éprouvette. Les deux thermomètres atteignent d'abord la température de 4°, puis le thermomètre inférieur y reste stationnaire, tandis que le thermomètre supérieur continue à baisser. En effet, dès que la température de 4° est atteinte pour toute l'éprouvette, les couches d'eau qui sont au contact de la glace se refroidissent, deviennent plus légères, montent à la

[1] Despretz, professeur de physique à la Sorbonne, mort en 1863, membre de l'Académie des sciences.

partie supérieure et sont remplacées par de nouvelles couches descendues en vertu de leur poids. Ces couches se refroidissent, et ainsi de suite. Quant aux couches inférieures, elles restent, en vertu de leur plus grande densité, au fond du vase, et sont, par suite, protégées contre le refroidissement.

Nous rappellerons que la température du maximum de densité de l'eau a été choisie pour la détermination du gramme.

187. **Dilatation des gaz.** — Tous les gaz ont à peu de chose près le même coefficient de dilatation qui est égal à 0,00367 ou $\frac{1}{273}$.

Nous pourrions donner ici comme application de la dilatation des gaz l'explication du tirage des cheminées ; mais nous traiterons ce sujet dans un paragraphe spécial sur le chauffage des appartements lorsque nous aurons étudié d'autres phénomènes calorifiques qu'il est important de connaître auparavant.

---

## CHAPITRE III

### CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — FUSION. SOLIDIFICATION. — VAPORISATION.

188. Nous avons vu que lorsqu'on chauffe un corps, de l'étain, par exemple, il commence par se dilater jusqu'à ce que, arrivé à une certaine température, il passe de l'état liquide à l'état solide. Ce changement d'état du corps est désigné sous le nom de *fusion*.

**Lois de la fusion.** — La fusion d'un corps est soumise aux deux lois suivantes :

1° *La fusion a toujours lieu à la même température pour un même corps ;*

2° *La température demeure constante pendant toute la durée de la fusion.*

Ces lois peuvent se vérifier en mettant un thermomètre en contact avec la substance que l'on étudie.

189. **Chaleur latente de fusion.** — Nous ferons remarquer qu'un corps conservant la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit l'intensité calorifique du foyer. Il faut admettre que la chaleur gagnée par le corps est tout entière absorbée par lui pour sa fusion, sans qu'elle soit employée à élever sa température: comme cette chaleur n'a pas d'influence sur le thermomètre plongé au milieu de la masse, on la désigne sous le nom de *chaleur latente* de fusion. Cette chaleur latente, qui n'est pas la même pour les différents corps, se détermine par des procédés que nous n'étudierons pas. Disons toutefois que la chaleur latente de fusion de la glace est égale à 79 ; cela veut dire qu'il faut autant de chaleur pour fondre un kilogramme de glace qu'il en faudrait pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0 à 79°. En effet, si l'on mélange un kilogramme de glace à 0° avec un kilogramme d'eau à 79°, on obtient deux kilogrammes d'eau à 0 ; donc toute la chaleur qu'on avait donnée au kilogramme d'eau pour l'élever de 0 à 79° a été cédée par lui et employée à fondre le kilogramme de glace, sans élever la température de l'eau résultant de cette fusion.

190. **Influence de la pression sur le point de fusion.**— La première loi de la fusion subit quelques exceptions. C'est ainsi que soumises à une puissante pression certaines substances solides se liquéfient à une température plus élevée que la température normale : telle est la paraffine. D'autres au contraire se liquéfient plutôt : telle est la glace.

M. Tyndall a fait à ce sujet une expérience très-remarquable. Il prend deux pièces de bois creusées chacune d'une cavité et les superpose en mettant en regard ces cavités, après avoir eu soin de placer entre elles une lame épaisse de glace. Puis il les soumet à une forte pression, la glace se brise, ses fragments remplissent la cavité ; sous l'influence de la pression une partie de cette glace se liquéfie, et l'eau provenant de cette fusion se répartit entre les fragments. Au moment où l'on fait cesser la pression, cette eau se solidifie de nouveau, soude entre eux tous ces fragments et l'on retire de l'appareil un bloc de glace ayant la forme des deux cavités superposées et qui paraît s'y être moulé.

191. **Point de fusion.** — Il y a de grandes différences entre les fusibilités des corps, et chaque substance a son *point de fusion* qui constitue une propriété caractéristique.

TABLEAU DU POINT DE FUSION DE DIVERSES SUBSTANCES.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Glace | 0° | Plomb | 330° |
| Beurre | 32 | Zinc | 450 |
| Suif | 33 | Bronze | 900 |
| Cire vierge | 61 | Argent | 1000 |
| Cire blanchie | 68 | Fonte | 1100 |
| Acide stéarique | 70 | Cuivre | 1150 |
| Phosphore | 44°,2 | Or | 1200 |
| Soufre | 111 | Platine | 2000 |
| Étain | 228 | | |

192. Certaines substances ont été considérées pendant longtemps comme infusibles; mais cela tenait à l'imperfection des moyens calorifiques employés. C'est ainsi que le platine a été considéré longtemps comme infusible. MM. Henri Sainte-Claire Deville et Debray sont cependant arrivés à fondre des masses considérables de platine en employant des fours en chaux vive chauffés par la flamme du gaz de l'éclairage qu'activait un courant d'oxygène.

Il est toutefois des substances que l'on ne peut parvenir à fondre: ce sont celles qui se décomposent avant que leur température de fusion soit atteinte. C'est ainsi que la craie, qui est composée d'un corps solide, la chaux, et d'un gaz, l'acide carbonique, se décompose dans le four du chaufournier avant qu'on soit arrivé à la fondre.

Le physicien anglais Halls[1] est pourtant arrivé à fondre la craie en empêchant le gaz acide carbonique de se dégager. Il emplissait avec de la craie en poudre un tube de fer très-épais, puis le scellait solidement. Il le soumettait ensuite à une température élevée et retrouvait, après le refroidissement, une substance solide semblable au marbre.

La plupart des corps appartenant aux règnes animal et végétal sont infusibles, parce qu'ils se décomposent par la chaleur en leurs éléments, l'oxygène, l'hydrogène, le carbone et l'azote.

193. **Dissolution.** — La dissolution d'un corps solide dans un liquide est un véritable phénomène de fusion. Le changement d'état du corps se fait ici sous l'influence d'une action spéciale que le liquide exerce sur le solide, et que l'on a désignée sous le nom de *force dissolvante*. C'est sous l'influence de cette force

[1] Halls, né en 1667 dans le comté de Kent, mort en 1761.

que le sucre se dissout dans l'eau, que le phosphore se dissout dans le sulfure de carbone, etc.

Il y a ici encore absorption de chaleur, et si le phénomène se produit souvent sans qu'il y ait intervention apparente de calorique, il n'en est pas moins vrai de dire que la fusion du corps nécessite l'absorption d'une certaine quantité de chaleur qui est empruntée au liquide lui-même. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que beaucoup de substances, en se dissolvant dans l'eau, produisent un abaissement de température; ainsi, par exemple, l'azotate d'ammoniaque. Si l'on mélange parties égales de ce sel et d'eau à 10° au-dessus de zéro, la dissolution fait baisser la température jusqu'à 15° au-dessous de zéro.

Dans certains cas, le phénomène physique de la dissolution est accompagné d'un phénomène chimique qui consiste dans la combinaison du solide avec le liquide. Cette combinaison se produit, comme toutes les combinaisons chimiques, avec dégagement de chaleur. C'est ce qui explique que la dissolution d'un corps n'est pas toujours accompagnée d'un abaissement de température.

Tantôt la température ne varie pas sensiblement pendant la dissolution du corps; c'est qu'alors la chaleur dégagée par la combinaison compense l'effet inverse produit par la dissolution. Tantôt, au contraire, il y a élévation de température, parce que la chaleur dégagée pendant la combinaison est plus considérable que la chaleur absorbée par le changement d'état. L'exemple suivant peut servir à mettre en évidence les effets inverses de cette double influence.

Mélangeons quatre parties d'acide sulfurique et une partie de glace. L'affinité, ou tendance à la combinaison, que l'acide sulfurique a pour l'eau, détermine la fusion de la glace et, par suite, une absorption de chaleur latente; mais l'abaissement de température qui en résulterait est bientôt compensé par la chaleur que dégage aussi la combinaison de l'eau et de l'acide sulfurique, et la température s'élève finalement jusqu'à près de 100°.

Mélangeons, au contraire, quatre parties de glace et une partie d'acide sulfurique; le thermomètre plongé dans la masse descendra jusqu'à 20° au-dessous de zéro. C'est qu'en effet le dégagement de chaleur diminuant avec la quantité d'acide employé, il y a moins de chaleur produite ici que dans le cas précédent, puisqu'on a employé quatre fois moins d'acide, tandis

qu'au contraire le poids de glace employé étant quatre fois plus grand, il y a quatre fois plus de chaleur latente absorbée.

194. **Mélanges réfrigérants.** — La production artificielle du froid au moyen des *mélanges réfrigérants* repose sur les principes précédents. En mélangeant de la glace et du sel en parties égales, on peut obtenir une température de 17° au-dessous de zéro. Ici, il y a deux causes d'abaissement de température: la fusion de la glace et le passage du sel de l'état solide à l'état liquide. En même temps, la combinaison du sel avec l'eau tend à élever la température, mais cette dernière influence étant la plus faible, il y a, en définitive, production de froid. On comprend facilement que, si l'on plonge des corps au milieu de ce mélange, ils se refroidiront, puisque la chaleur nécessaire au changement d'état leur sera empruntée.

Il n'y a pas que la glace et le sel qui jouissent de la propriété de produire du froid par leur action réciproque : cinq parties de sel ammoniac, cinq parties de salpêtre et seize parties d'eau mélangées peuvent abaisser la température de 10° au-dessus de zéro jusqu'à 12° au-dessous; trois parties de sulfate de soude et huit parties d'acide chlorhydrique abaissent la température de 10° au-dessus de zéro jusqu'à 17° au-dessous; deux parties de neige ou de glace pilée et trois parties de chlorure de calcium font baisser le thermomètre de 0° à 27° au-dessous de zéro.

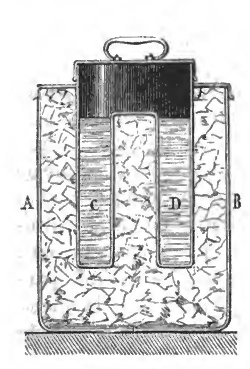



Fig. 166.

195. **Glacières artificielles.** — L'emploi du mélange d'acide chlorhydrique et de sulfate de soude a pris une certaine extension par suite de l'usage des glacières artificielles. Ces appareils sont formés d'un seau en fer-blanc AB (fig. 166) entièrement recouvert de lisières de drap, dans l'intérieur duquel on place le mélange réfrigérant. Au milieu de ce dernier se trouve un vase CD qui renferme le liquide à congeler. Pour augmenter la surface de contact, on lui donne la forme que représente la figure. La glace fabriquée par ce procédé ne revient, dit-on, qu'à 60 cent. le kilogramme, prix bien supérieur à celui auquel

elle revient lorsqu'on la fabrique à l'aide de l'appareil de M. Carré, dont nous indiquerons plus loin (208) le principe.

196. **Solubilité.** — La quantité maximum de substance solide qu'un poids déterminé de liquide peut dissoudre, varie avec la nature du liquide, avec celle du solide, avec la température. Lorsqu'un liquide a dissous d'un corps tout ce qu'il peut en dissoudre, on dit qu'il *est saturé.* Généralement, l'élévation de la température recule la limite de saturation. Il est cependant certaines substances qui sont moins solubles à chaud qu'à froid ; ainsi la chaux est plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude, le sulfate de soude est plus soluble dans l'eau à 33° que dans l'eau à une température supérieure ou inférieure.

197. **Cristallisation par voie humide.** — Si l'on prend une dissolution saturée à chaud d'un corps plus soluble à chaud qu'à froid, et qu'on laisse refroidir lentement le liquide, son pouvoir dissolvant diminue à mesure que la température baisse, et la substance dissoute revient petit à petit à l'état solide, en affectant des formes géométriques régulières ; on dit alors que le solide a *cristallisé.* Dans ce cas, la cristallisation est dite cristallisation par *voie humide*, par opposition à la cristallisation par *voie sèche* dont nous parlerons bientôt.

198. **Solidification.** — Si les solides se fondent lorsqu'on les chauffe, inversement les liquides se solidifient quand on les refroidit. Cette solidification a lieu à des températures différentes pour les différents corps. Certains liquides n'ont pas encore été solidifiés ; mais on doit attribuer cette impossibilité à ce que l'on ne possède pas encore de moyens assez énergiques de refroidissement.

199. **Lois de la solidification.** — La solidification est soumise à trois lois :

1° *Le point de solidification d'une substance est fixe ; il est le même que le point de fusion ;*

2° *La température reste la même pendant tout le temps que dure la solidification ;*

3° *La solidification est accompagnée du dégagement de toute la chaleur latente absorbée pendant la fusion.*

200. **Retard de la solidification.** — Il peut arriver que, dans certaines circonstances, le point de solidification d'un corps soit retardé. Ainsi l'eau peut, quand elle se trouve dans un lieu dont l'air est parfaitement calme, descendre, en restant liquide,

à une température bien inférieure à son point ordinaire de solidification, qui est 0°. Despretz est parvenu à la maintenir liquide jusqu'à 20° au-dessous de zéro. Mais, dès qu'on imprime au liquide la moindre secousse, la solidification est immédiate.

La cristallisation par voie humide présente des anomalies semblables. Introduisons dans un tube en verre fermé par un bout et effilé à l'autre une dissolution bouillante et presque saturée de sulfate de soude ; faisons bouillir le liquide de manière à chasser l'air, puis, fermant le tube à la lampe, laissons-le refroidir lentement sans l'agiter, le sulfate de soude ne cristallisera pas. Mais, dès que nous briserons la pointe du tube, la rentrée de l'air produira une agitation qui déterminera la cristallisation immédiate et complète du sel.

201. **Changements de volume pendant la fusion et la solidification.** — La plupart des corps augmentent de volume au moment où ils se fondent, et réciproquement leur solidification est accompagnée d'une contraction. L'eau fait cependant exception ; elle augmente de volume lorsqu'elle se solidifie. La glace est, par suite, moins dense que l'eau, et c'est ce qui explique pourquoi, pendant l'hiver, les glaçons flottent à la surface des rivières. On dit alors qu'elles *charrient*.

La dilatation de l'eau, au moment de la congélation, se fait avec une force considérable. Huyghens observa qu'un canon de fer qu'il avait complétement rempli d'eau, qu'il avait ensuite fermé et plongé dans un mélange réfrigérant, se brisait avec bruit, au moment de la congélation du liquide intérieur.

Cette expérience explique la rupture, pendant les gelées, des vases remplis d'eau. Les pierres dites *gélives* se fendent, parce que l'eau qu'elles contiennent augmente de volume au moment de sa solidification. C'est de là que vient l'expression : *Il gèle à pierre fendre*. On conçoit de même les ravages produits par les gelées tardives dans les végétaux qu'elles frappent au moment où la séve commence à circuler.

202. **Cristallisation par voie sèche.** — Lorsqu'on a fondu un corps par l'action de la chaleur et qu'on le laisse refroidir lentement, il revient lentement aussi à l'état solide en affectant des formes géométriques régulières. On dit alors que la cristallisation a eu lieu *par voie sèche*. Le soufre nous offre un bel exemple de ce phénomène.

203. **Vaporisation.** — Les corps peuvent subir un troisième changement d'état en passant de l'état liquide à l'état de gaz ou de vapeur : ce phénomène est désigné sous le nom de *vaporisation*. On appelle *vapeurs* les fluides aériformes dans lesquels peuvent se transformer les liquides, lorsqu'ils sont placés dans des conditions convenables. Cette transformation peut s'effectuer dans trois circonstances principales :

1° Plaçons quelques gouttes d'eau sous le récipient de la machine pneumatique et raréfions l'air. Au bout de peu de temps, les gouttes d'eau ont disparu et se sont transformées en un fluide invisible, qui ne trouble pas la transparence de l'atmosphère du récipient. L'eau n'est cependant pas anéantie, et, ce qui le prouve bien, c'est que si nous avons aussi introduit dans le récipient un fragment de potasse, substance avide d'humidité, nous constaterions que ce fragment s'est humecté au contact de la vapeur produite. La vaporisation du liquide aurait été d'ailleurs bien plus rapide si nous avions introduit l'eau dans le vide absolu, dans la chambre d'un baromètre.

2° Si nous mettons un peu d'eau dans une assiette, et que nous l'abandonnions à l'air libre, nous la verrons peu à peu diminuer, puis disparaître complétement. On dit alors qu'il y a eu *évaporation* du liquide.

L'évaporation peut être considérée comme produite d'une manière analogue à la vaporisation dans le vide. L'air qui se trouve en contact avec l'eau présente des pores, dont chacun peut être considéré comme formant une petite chambre barométrique dans laquelle la vapeur se précipite.

3° L'intervention directe d'un foyer de chaleur peut hâter le phénomène de la vaporisation : c'est ainsi que le mercure, qui, à la température ordinaire, ne fournit pas de vapeurs sensibles, en produit lorsqu'on le chauffe. Plaçons de l'eau dans un vase sur le feu ; au bout de peu de temps, nous voyons la masse liquide s'agiter, devenir tumultueuse, et la quantité d'eau diminuer sensiblement ; au bout d'un temps suffisant, le vase se trouve à sec. Lorsque la vaporisation se fait dans les conditions précédentes, avec agitation intérieure du liquide, on dit qu'il y a *ébullition*.

204. Avant d'entrer dans l'étude spéciale des trois phénomènes dont nous venons de signaler l'existence, voyons à quelles conditions générales ils sont soumis.

Que la vaporisation ait lieu dans le vide, à l'air libre, ou par suite de l'intervention d'un foyer de chaleur, il y a toujours absorption de calorique. Quand on n'en fournit pas directement au liquide, il en emprunte aux corps avec lesquels il est en contact. Tout le monde sait que l'été, après la pluie, *le temps est souvent rafraîchi.* Cela tient à l'évaporation de l'eau qui se produit sur de larges surfaces. Qu'on entoure le réservoir d'un thermomètre d'un peu de ouate, qu'on y verse de l'éther, le liquide s'évaporant rapidement à l'air empruntera au thermomètre une certaine quantité de chaleur et cet emprunt sera rendu évident par l'abaissement du mercure.

L'emploi des *alcarazas,* dont on se sert pour maintenir l'eau fraîche dans les pays chauds, est fondé sur ce principe. Les alcarazas sont des vases en terre poreuse ; l'eau dont on les emplit suinte à travers leurs pores, vient s'évaporer à leur surface et emprunte pour cela au liquide intérieur une certaine quantité de chaleur; par suite, celui-ci se refroidit.

Quand un kilogramme d'eau se réduit en vapeur, il absorbe une quantité de chaleur égale à celle qu'il faudrait donner à 630 kilogrammes de ce liquide pour élever leur température de 1°.

205. **Congélation de l'eau dans le vide.** — L'expérience suivante peut mettre en évidence la quantité de chaleur absorbée par l'eau pour sa vaporisation. Elle est due à Leslie, physicien écossais mort en 1388. On place sous le récipient de la machine pneumatique une large capsule A (fig. 167), à demi pleine d'acide sulfurique. Un autre vase beaucoup plus petit, mince et rempli d'eau, est posé à l'aide de trois pieds sur les bords de la capsule. On fait le vide, l'eau s'évapore avec rapidité ; l'acide sulfurique, en vertu de son affinité pour l'eau, absorbe les vapeurs à mesure qu'elles se produisent, et maintient le vide. L'eau se congèle bientôt, par suite du refroidissement que son évaporation lui a fait éprouver.

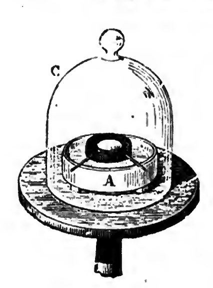


Fig. 167.

206. **Sublimation.** — Les corps solides sont capables aussi de se résoudre en vapeurs ; l'arsenic, par exemple, peut passer de l'état solide à l'état de vapeur, sans passer par l'état liquide. On vit alors qu'il y a *sublimation.*

**207. Liquéfaction des vapeurs et des gaz.** — Si l'on place une vapeur dans des conditions absolument inverses de celles qui ont présidé à sa formation, il est naturel qu'elle reprenne l'état liquide. C'est ce que l'expérience vérifie de tous points. Pendant l'hiver, la vapeur qui se trouve dans nos appartements chauffés reprend l'état liquide au contact des vitres refroidies par l'air extérieur. C'est pour la même raison que la vapeur d'eau, qui sort continuellement de nos poumons par l'acte de la respiration, se transforme en petites gouttelettes, sous l'apparence d'un brouillard, lorsque, pendant l'hiver, elle arrive au milieu de l'air froid.

Une vapeur revient aussi à l'état liquide lorsqu'on augmente assez la pression qu'elle supporte.

Ce changement d'état, que l'on appelle *condensation*, est accompagné d'un dégagement de chaleur, car la vapeur abandonne celle que le liquide avait absorbée pour se vaporiser.

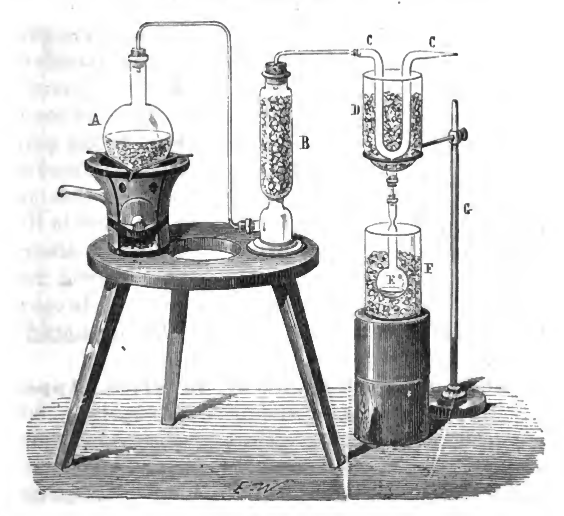



Fig. 168.

Les vapeurs présentant, comme nous le verrons bientôt, des analogies frappantes avec les gaz, il était naturel de supposer qu'en soumettant ceux-ci, soit à un refroidissement, soit à une

augmentation de pression, soit enfin aux deux moyens à la fois, on les ramènerait à l'état liquide. C'est ce qu'a fait M. Faraday, dans une série de remarquables expériences. L'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone et le gaz des marais sont, parmi les gaz connus, les seuls qui n'aient pu être liquéfiés ; ils sont dits *permanents*.

Qu'on mette, par exemple, en A (fig. 168) les substances nécessaires pour la préparation du gaz acide sulfureux, en B des corps capables de le dessécher au passage, en D un mélange réfrigérant au milieu duquel plonge un tube CC communiquant avec un ballon E plongeant aussi dans un mélange réfrigérant. Le gaz acide sulfureux, soumis à l'action du mélange D, se liquéfie et tombe en gouttelettes dans le vase E.

Le protoxyde d'azote, l'acide carbonique, ont été liquéfiés par la pression.

Qu'on place en A (fig. 169), dans un tube à parois épaisses, une substance appelée chlorure d'argent à laquelle on a fait absorber une grande quantité de gaz ammoniac ; qu'après l'avoir fermé, on chauffe A en refroidissant B, le gaz quitte le chlorure d'argent, va s'accumuler en B et s'y liquéfier sous sa propre pression. Que, par un moyen quelconque, on laisse le liquide produit se transformer de nouveau en gaz, il y aura absorption d'une grande quantité de chaleur, production de froid intense. C'est ce principe qu'a si bien utilisé M. Carré dans la construction de ses appareils réfrigérants pour la fabrication artificielle de la glace.

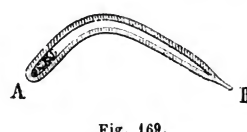


Fig. 169.

**208. Fabrication artificielle de la glace. Appareils Carré.** — M. Carré emploie le liquide connu dans le commerce sous le nom d'*alcali volatil*. Ce corps n'est autre qu'une dissolution de gaz ammoniac dans l'eau, et ce liquide, sous un petit volume, en renferme une quantité considérable, puisqu'un litre d'eau à la température de 10° peut dissoudre 1000 litres de gaz. Mais si l'eau a une affinité considérable pour le gaz ammoniac à la température ordinaire, elle ne saurait le retenir lorsqu'on l'échauffe. Portons à 138° une dissolution saturée de ce corps, et au

[1] Faraday, physicien anglais, né en 1797, à Newington-Surrey, mort en 1867.

bout de peu de temps le liquide sera tellement appauvri qu'il ne contiendra plus que des quantités insignifiantes de gaz.

Cela posé, les appareils construits par M. Carré sont de deux sortes : les uns sont *intermittents*, ce sont ceux qui peuvent servir dans l'économie domestique ; les autres, dits *continus*, sont livrés à l'industrie. Nous ne décrirons que les premiers.

Supposons une chaudière C (fig. 170) remplie aux trois quarts

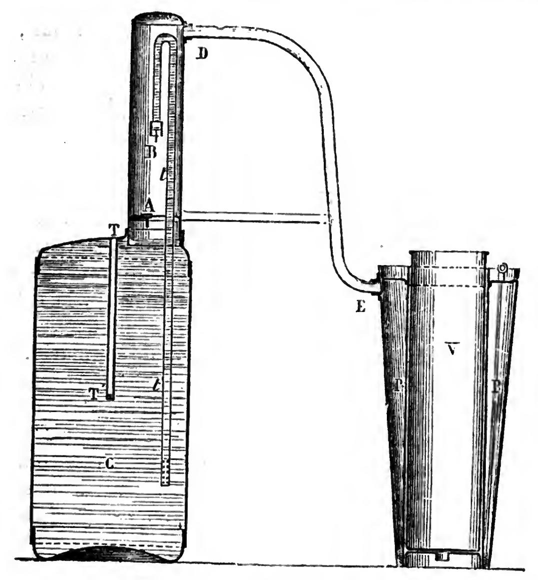



Fig. 170.

d'une dissolution aqueuse d'ammoniaque et communiquant par un tube DE avec un récipient PP à double paroi appelé *congélateur*, et qui plonge au milieu d'un baquet plein d'eau froide. Au centre de ce récipient se trouve le vase V où on congèle l'eau. En T se trouve un tube en fer plongeant dans la dissolution et dans lequel on met un thermomètre. Plaçons la chaudière sur un fourneau, le liquide va s'échauffer, et, au bout de peu de temps, le gaz qu'il tenait en dissolution se sera dégagé : ce gaz s'échappe par la soupape A et par le tube DE qui le conduit entre les parois

PP du congélateur. Il s'y accumule et exerce sur lui-même une pression qui en liquéfie la plus grande partie. Nous avons alors un liquide d'une extrême fluidité, volatil à la température ordinaire de l'air. Retirons le feu du fourneau, l'eau de la chaudière se refroidit; l'ammoniaque liquéfiée, volatile à la température ordinaire, repasse à l'état de gaz pour aller se dissoudre de nouveau dans le liquide appauvri de la chaudière C. Elle soulève pour cela la soupape B et descend par le tube *tt*, dont la partie inférieure percée de trous l'amène au milieu de l'eau. Mais, cette volatilisation ne pouvant avoir lieu que si le liquide emprunte aux corps environnants une quantité considérable de chaleur, l'eau que l'on a mise dans le vase V fournit cette chaleur, se refroidit et se congèle. Enlevons la glace formée, remplaçons-la par une nouvelle quantité d'eau, replaçons les charbons dans le fourneau, et l'opération recommence avec le même succès.

Cette machine présentait pour l'industrie l'inconvénient de nécessiter une intermittence dans le travail; aussi M. Carré livra-t-il bientôt des appareils dit *continus*, qui sont employés maintenant non-seulement à fabriquer la glace, mais aussi à extraire, par refroidissement, le sulfate de soude que contiennent les eaux de la mer, qui ont déjà servi à l'extraction du sel marin.

209. **Congélateur E. Carré.** — M. Edmond Carré, frère de l'inventeur de l'appareil précédent, a exposé en 1867 des appareils qui réalisent en grand l'expérience de Leslie (205). Ils se composent d'une pompe faisant le vide dans un vase contenant de l'eau et séparé de la pompe par un réservoir d'acide sulfurique qui absorbe les vapeurs à mesure qu'elles se produisent.

---

## CHAPITRE IV

### FORMATION ET PROPRIÉTÉS DES VAPEURS. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

210. Lorsqu'on introduit (203) un liquide dans la chambre barométrique, il disparaît bientôt sous forme de vapeur. Cette

disparition du liquide n'est pas le seul phénomène observé, elle est accompagnée d'une dépression dans la colonne mercurielle du baromètre. Cette dépression ne peut s'expliquer qu'en admettant que les vapeurs exercent comme les gaz une force élastique sur les corps avec lesquels elles sont en contact.

Héron [1], dans son *Traité de pneumatique*, avait déjà signalé l'existence de cette force élastique. Il remarqua que si l'on chauffe de l'eau dans un vase (fig. 171) dont l'orifice est bouché

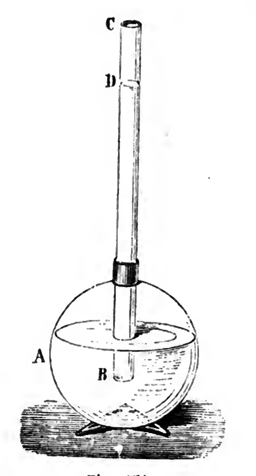



Fig. 171.

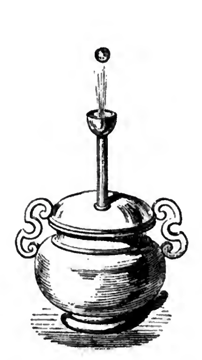


Fig. 172.

par une sphère métallique, il arrive un moment où la vapeur s'échappe en soulevant la sphère.

L'expérience suivante, faite en 1615 par Salomon de Caus, prouve bien aussi la force élastique des vapeurs. Un vase A (fig. 172) est en partie rempli d'eau au milieu de laquelle plonge un tube CB. Si l'on vient à chauffer le vase A, l'eau se vaporise, et, la vapeur s'accumulant dans la partie supérieure, sa force élastique fait monter le liquide dans le tube jusqu'en D.

211. **Les vapeurs suivent-elles la loi de Mariotte?** — Puisque les vapeurs sont douées comme les gaz d'une force élas-

1 Héron d'Alexandrie vivait vers l'an 120 avant J.-C.

tique, il est nécessaire de rechercher si elles suivent la loi de Mariotte. Il faut pour cela distinguer deux cas :

1° *Les vapeurs ne sont pas en contact avec un excès du liquide qui leur a donné naissance;*

2° *Les vapeurs sont en contact avec un excès de liquide.*

Dans le premier cas, en soulevant ou en abaissant au milieu du mercure le tube barométrique dans lequel on a fait l'expérience, de manière à augmenter ou à diminuer le volume de la vapeur, on voit que la colonne de mercure soulevée varie et que la force élastique de la vapeur suit la loi de Mariotte. Il est évident que cette force élastique est égale dans chaque cas à la différence des colonnes de mercure soulevées dans le tube et dans un baromètre normal.

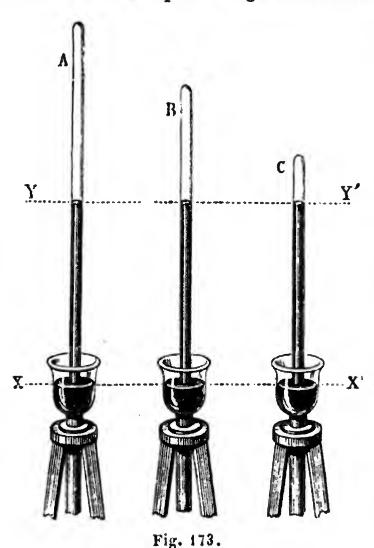


Fig. 173.

Dans le second cas, on introduit dans le tube barométrique une quantité de liquide à vaporiser suffisante pour qu'après la vaporisation il en reste encore une couche au sommet du mercure. Si l'on vient alors à soulever ou à abaisser le tube dans la cuvette profonde, on remarque, comme le représente la figure 173, que la colonne de mercure soulevée reste constante et ne quitte pas le niveau Y'Y; ce qui prouve que, malgré la variation de volume, la vapeur a conservé une force élastique constante, et, par suite, n'obéit pas à la loi de Mariotte. Cette force élastique est désignée en physique sous le nom de *tension maximum*.

212. **Vapeurs saturantes.** — Si, en même temps qu'on observe la colonne mercurielle soulevée dans le tube, au moment où on fait varier le volume réservé à la vapeur, on examine attentivement la petite couche d'eau qui surmonte le mercure, on s'aper-

çoit que sa hauteur varie ; elle diminue lorsqu'on soulève le tube; elle augmente lorsqu'on l'abaisse. On conçoit alors l'invariabilité de la force élastique ; elle tient à ce que la vapeur n'est pas en quantité constante, mais en quantité proportionnelle à la capacité de la chambre barométrique. Si toute l'eau ne s'est pas vaporisée dès le début de l'expérience, c'est que l'espace, qui était réservé à la vapeur, contenait tout ce qu'il *pouvait en contenir*; il était *saturé*, la vapeur était *saturante*. Dès qu'on a soulevé le tube, cet espace augmentant, une nouvelle quantité de liquide a pu se vaporiser ; dès qu'on l'a abaissé, cet espace diminuant, une partie de la vapeur est revenue à l'état liquide.

Il ne faut pas oublier que la saturation et le maximum de tension sont deux propriétés inséparables; une vapeur saturante est au maximum de tension, puisque, dès qu'on la comprime, elle revient en partie à l'état liquide sans changer de force élastique; une vapeur au maximum de tension est saturante, puisque, dès qu'on cherche à augmenter sa force élastique par la compression, elle reprend l'état liquide.

213. **Influence de la température sur le maximum de tension.** — Dans les expériences précédentes, nous avons supposé que la température reste invariable. Voyons maintenant ce qui arrive quand la température de la vapeur et du liquide volatil vient à changer.

Prenons pour cela l'appareil connu sous le nom d'appareil de Dalton[1]. Soit une cuvette C (fig. 174) pleine de mercure sur laquelle reposent deux baromètres E, F : le premier E

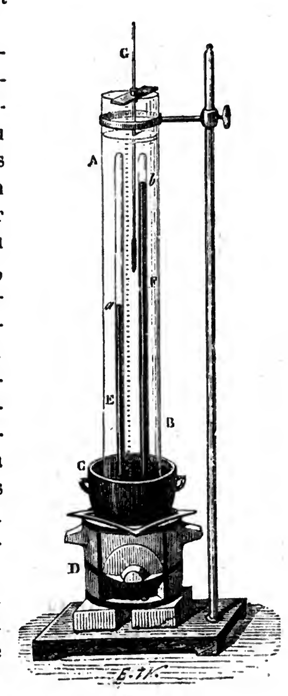


Fig. 174.

[1] Dalton, physicien anglais, né en 1765 à Inglesband, mort à Manchester en 1844.

renfermant de la vapeur en contact avec le liquide générateur, le second F étant un baromètre normal ; entourons-les d'un manchon AB rempli d'eau et portons le tout sur un fourneau D. A mesure que la chaleur du fourneau élèvera la température de l'eau du manchon, et, par suite, celle de la vapeur, on verra la différence entre les niveaux *a* et *b* augmenter ; or, cette différence mesurant la force élastique de la vapeur, il résulte de cette expérience que la tension maximum augmente avec la température. Comme on voit en même temps la couche de liquide générateur diminuer, on en conclut que plus la température s'élève, plus la limite de saturation de l'espace recule.

Il est important de déterminer la tension de la vapeur d'eau à des températures différentes, c'est ce qu'ont fait un certain nombre de physiciens, parmi lesquels nous citerons Dalton, Gay-Lussac [1], Arago [2] et M. Regnault. Nous n'examinerons pas les procédés qu'ils ont employés, et nous transcrirons seulement le résultat de leurs recherches.

TENSIONS DE LA VAPEUR D'EAU DANS LE VIDE, D'APRÈS M. REGNAULT.

| TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE à mercure. | TENSIONS. | TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE à mercure. | TENSIONS. |
|---|---|---|---|
| Degrés. | Millimètres. | Degrés. | Millimètres. |
| — 20 | 0,91 | 70 | 233.09 |
| — 10 | 2.08 | 80 | 354,64 |
| 0 | 4,60 | 90 | 525,45 |
| 10 | 9,16 | 100 | 760,00 |
| 20 | 17,39 | 120 | 1483,00 |
| 30 | 31,55 | 140 | 2682,00 |
| 40 | 54,91 | 160 | 4580,00 |
| 50 | 91,98 | 180 | 7366,00 |
| 60 | 148,89 | 200 | 11360,00 |

**214. Influence de la nature du liquide sur le maximum de tension.** — La nature des liquides a une grande in-

[1] Gay-Lussac, physicien et chimiste, né en 1778 à Saint-Léonard (Haute-Vienne), mort en 1850, professeur de physique à la faculté des sciences de Paris, et membre de l'Académie des sciences.

[2] Arago (François), physicien et astronome français, membre de l'Académie des sciences, né à Estagel, mort en 1853.

fluence sur la valeur du maximum de tension de la vapeur à une température donnée. Plusieurs baromètres A, B, C, D (fig. 175), sont disposés les uns à côté des autres dans une même cuvette. A est un baromètre ordinaire; dans B, on a fait passer de l'eau; dans C, de l'alcool; dans D, de l'éther, et on voit aussitôt le mercure s'y abaisser de quantités inégales au-dessous de son niveau primitif, ce qui prouve que les tensions de ces différentes vapeurs sont différentes aussi.

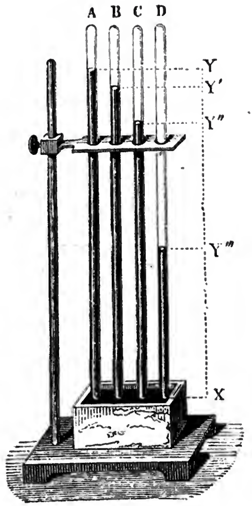


Fig. 175.

215. **Mélange des gaz et des vapeurs.** — Nous avons vu dans tout ce qui précède que les liquides se vaporisent plus vite dans le vide que dans l'air; il faut maintenant rechercher si la présence d'un gaz dans un espace influe seulement sur la vaporisation, mais aussi sur la quantité de vapeur que peut contenir cet espace. Gay-Lussac a démontré :

1° Que la présence du gaz *n'avait aucune influence sur la quantité de vapeur que pouvait renfermer un espace limité; que la tension maximum de la vapeur au milieu du gaz saturé était la même que dans le vide à la même température;*

2° *Que la tension du mélange de gaz et de vapeur était égale à la somme des tensions du gaz et de la vapeur considérés chacun comme occupant le volume du mélange.*

Nous admettrons ces deux lois sans donner les détails du procédé employé par Gay-Lussac.

---

# CHAPITRE V

## ÉVAPORATION. — ÉBULLITION.

216. Nous avons indiqué les phénomènes qu'on désigne en physique sous le nom d'ébullition et d'évaporation, et nous allons maintenant examiner avec plus d'attention les conditions dans lesquelles ils se produisent.

217. **Évaporation.** — Lorsqu'un liquide volatil est abandonné à l'air libre, il se transforme peu à peu en vapeur qui se répand au milieu de l'air. Nous avons déjà dit que ce phénomène se rapprochait beaucoup de celui de la formation des vapeurs dans le vide, et que les pores de l'air pouvaient être considérés comme autant de petites chambres barométriques dans lesquelles se précipitait la vapeur. L'évaporation a pour caractères particuliers:

1° *Que la vapeur se forme à la surface du liquide;*

2° *Qu'elle se produit sans agitation intérieure de la masse.*

218. **Des causes qui influent sur la rapidité de l'évaporation.** — 1° *Quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.* Il est évident que l'évaporation sera d'autant plus rapide que la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère sera plus petite.

2° *Étendue de la surface libre du liquide.* La rapidité de l'évaporation augmente aussi avec la surface de contact du liquide et de l'air ambiant, puisque le nombre des points sur lesquels la vapeur se produit augmente lui-même avec cette surface.

3° *Agitation de l'air.* Dans un air parfaitement calme, l'évaporation est lente, car la couche d'air en contact avec le liquide est bientôt saturée. Si, au contraire, l'atmosphère est agitée, cette agitation amène à chaque instant au-dessus du liquide de nouvelles couches capables de recevoir de nouvelles vapeurs. On sait que la pluie qui mouille le sol est bientôt évaporée, si elle est suivie d'un vent un peu fort; que le linge mouillé se sèche rapidement lorsqu'il est frappé par le vent. Cette dessiccation est d'autant plus prompte que le vent est plus sec.

Quand, en été, la peau est mouillée par la sueur, il faut éviter de rester dans un courant d'air, attendu que l'évaporation de ce liquide se faisant avec plus de rapidité, déterminerait un refroidissement pouvant avoir des suites funestes.

4° *Température du liquide et du milieu environnant.* Plus la température du liquide est élevée, plus il se vaporise facilement, puisque la tension maximum de la vapeur augmente avec la température. La température du milieu environnant doit aussi accélérer l'évaporation, puisque l'élévation de cette température recule, comme nous l'avons vu, la limite de saturation de l'espace.

219. **Ébullition.** — Lorsqu'un liquide contenu dans un vase est soumis à l'action d'une source calorifique, il entre en ébullition au bout d'un certain temps. Voyons quelles sont les causes de ce phénomène et en quoi il consiste.

Les parois du vase se sont échauffées les premières et ont transmis la chaleur au liquide qui était en contact avec elles. La couche liquide échauffée devenant moins dense s'est élevée à la surface et a été remplacée par une couche froide et plus dense; celle-ci, s'échauffant à son tour, a été remplacée par une troisième, et ainsi de suite. Il s'établit ainsi dans le vase un double courant de couches froides qui descendent et de couches chaudes qui montent, de telle sorte que les molécules liquides s'échauffent successivement, et la température de toute la masse s'élève graduellement. Des vapeurs commencent à se dégager de la surface du liquide. Mais, au bout d'un certain temps, des bulles de vapeur se forment au fond du vase dans les couches les plus rapprochées du foyer : elles s'élèvent, et, arrivées au milieu de parties plus froides, se condensent. Il en résulte une agitation du liquide qui produit un petit frémissement, que l'on désigne sous le nom de *chant du liquide*. Cette condensation est elle-même accompagnée d'un dégagement de chaleur qui augmente aussi la température, si bien que peu à peu les bulles montent à une hauteur plus considérable et peuvent enfin arriver à la surface du liquide. A partir de ce moment, le liquide est en pleine *ébullition*, les bulles de vapeur agitent la masse et la font bouillonner. Cette agitation du liquide est un des caractères particuliers de la vaporisation par *ébullition*.

220. **Lois de l'ébullition.** — Le phénomène de l'ébullition est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Un même liquide placé dans des conditions extérieures identiques commence toujours à bouillir à la même température ;*

2° *Pendant toute la durée de l'ébullition la température du liquide reste constante.*

Ces deux lois se vérifient facilement par l'expérience. Nous ferons remarquer que dans l'énoncé de la première loi nous avons spécifié que ce liquide devait rester dans des conditions extérieures identiques; c'est qu'en effet la variation de ces conditions entraîne aussi la variation de la température du point d'ébullition, comme nous allons maintenant le faire voir.

221. **Influence de la pression extérieure sur la température d'ébullition.** — Les bulles qui se forment au sein du liquide étant saturées, ne peuvent évidemment supporter une pression supérieure à leur tension maximum, sans se condenser. Il faut donc, pour qu'elles se forment, qu'elles atteignent la température à laquelle elles sont douées d'une force élastique égale à la pression qu'elles supportent. Il est évident, dès lors, que la tem-

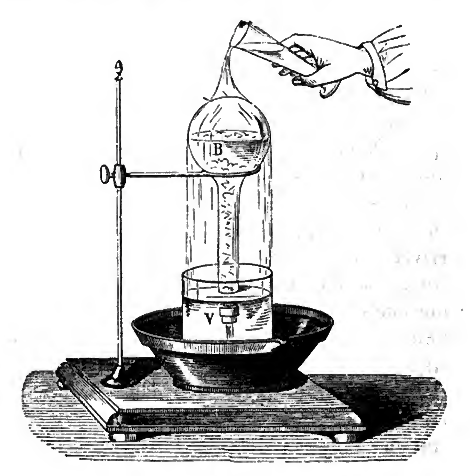



Fig. 176.

pérature d'ébullition doit s'élever ou s'abaisser, suivant que la pression exercée sur le liquide s'élève ou s'abaisse elle-même.

Sous une pression de 760$^{mm}$, dans un vase en métal, l'eau bout à 100°. Il est facile de vérifier que, sous le récipient de la machine pneumatique, l'eau peut entrer en ébullition à des températures d'autant plus basses que le vide y est fait d'une manière plus complète. L'expérience suivante conduit au même résultat.

Dans un ballon B à long col (fig. 176), on fait bouillir de l'eau pendant dix minutes environ ; lorsque, par cette ébullition, la vapeur d'eau, en s'élevant, a chassé l'air du flacon, on bouche le vase, et on le retourne en plongeant l'extrémité du col dans un second vase plein d'eau V, afin d'empêcher toute rentrée d'air. L'ébullition cesse dès que le liquide a été soustrait à l'action de la chaleur ; mais si l'on vient à verser de l'eau froide sur le ballon, la vapeur qui seule exerce sa pression sur le liquide se condense en partie, et l'ébullition recommence.

Au bout d'une heure, on peut souvent encore faire bouillir le liquide par de nouvelles affusions d'eau froide.

Inversement, lorsqu'on augmente la pression, on retarde l'ébullition ; on peut même l'empêcher de se produire, si l'on opère dans un vase fermé. C'est ce qui arrive dans la marmite de Papin [1] (fig. 177). A est un vase de bronze contenant de l'eau. Il est fermé par un couvercle solidement fixé par la vis V sur l'ouverture de la marmite ; une soupape de sûreté S est fermée par une tige D à l'extrémité de laquelle se trouve suspendu un poids P : ce poids est réglé de façon que le levier se soulève, et par suite la soupape, pour laisser échapper la vapeur lorsqu'elle a atteint une pression trop considérable.

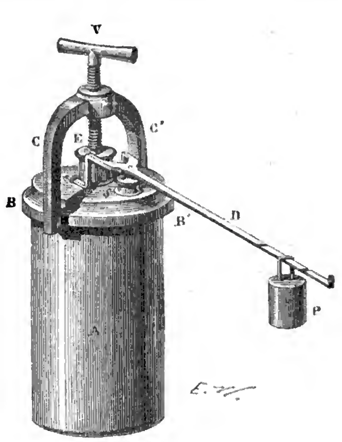


Fig. 177.

Si l'on chauffe cet appareil, la vapeur qui se produit exerce sa

[1] Papin (Denis), célèbre physicien, né à Blois en 1650, mourut en 1710.

pression sur le liquide et empêche les bulles de se produire. La température s'élève progressivement, et, dès qu'on ouvre la soupape, la vapeur sort avec violence, et l'eau entre immédiatement en ébullition.

222. **Influence de la profondeur du liquide dans le vase.** — Lorsque la couche liquide que l'on fait bouillir est très-profonde, la température qui règne au fond du vase est supérieure à 100°; car les bulles de vapeur, pour s'y former, doivent non-seulement triompher de la pression qui s'exerce sur la surface libre, mais encore du poids de la couche liquide qui les surmonte.

223. **Influence de la pureté du liquide.** — Lorsqu'un liquide tient en dissolution des substances étrangères, son point d'ébullition change. Ainsi l'eau saturée de sel marin ne bout qu'à 108°, 5.

224. **Influence de la nature du vase.** — La nature du vase a aussi son influence sur le point d'ébullition du liquide. Ainsi l'eau qui, sous une pression de 760$^{mm}$, bout à 100° dans un vase de métal, ne bout qu'à 101° environ dans un vase de verre. C'est qu'en effet la bulle de vapeur, pour se former au contact de la paroi, a non-seulement à triompher de la pression qu'elle supporte, mais aussi de la force d'adhérence qui s'exerce entre elle et cette paroi. Or on comprend que cette force puisse varier suivant la nature du vase. L'expérience suivante, due à Gay-Lussac, met cette vérité en évidence. On fait bouillir de l'eau dans un vase de verre; on l'éloigne un peu du feu, l'ébullition cesse; mais si l'on vient à projeter dans l'intérieur du vase des parcelles de cuivre, l'ébullition recommence aussitôt au contact de ces parcelles. C'est qu'en effet, là où elles ont été se placer, elles se sont substituées à la paroi de verre, et, l'adhérence qui s'exerce entre elles et la vapeur étant moins grande qu'entre celle-ci et le verre, l'ébullition a pu recommencer, quoique la température se fût abaissée.

225. **Influence de la cohésion du liquide.** — La cohésion du liquide exerce une influence de la même nature. La vapeur ne peut en effet se former sans écarter les molécules. Or, plus le liquide a de cohésion, plus l'effort qu'elle doit vaincre est considérable; par suite, pour qu'elle en triomphe, il faut que la température s'élève. Mais dès que la cohésion est vaincue, la vapeur se dégage brusquement; de là des mouvements saccadés, des

soubresauts. C'est ce qui arrive avec l'acide sulfurique, le mercure, les huiles. Pour empêcher les soubresauts de l'acide sulfurique pendant son ébullition, il suffit d'y jeter des fragments de platine ou de porcelaine. Ils se substituent au liquide dans les endroits où ils sont en contact avec la vapeur qui tend à se former; et comme l'adhérence est moins grande entre eux et la vapeur qu'entre celle-ci et le liquide, la vaporisation se fait d'une manière plus graduée, et les soubresauts sont évités.

226. **Point d'ébullition.** — Chaque liquide a son point d'ébullition, et c'est là ce qui constitue une propriété caractéristique pour chacun d'eux. Ainsi, sous une pression de $760^{mm}$, l'eau bout à 100°, l'alcool à 78°, la benzine à 80°, l'éther à 36°, l'essence de térébenthine à 161°, le mercure à 360°.

227. **Distillation.** — On appelle distillation l'opération par laquelle on sépare des substances volatiles de substances qui ne le sont pas ou qui le sont moins que les premières. Ainsi l'eau des fleuves, des rivières, n'est pas pure : elle renferme des sels en dissolution; pour l'en séparer, on la distille. L'appareil dont on se sert est appelé *alambic*.

Une chaudière en cuivre C (fig. 178), appelée *cucurbite*, contient l'eau à distiller; elle est échauffée par la flamme du foyer F. Le liquide entre en ébullition, sa vapeur monte dans le *chapiteau* A, passe dans le tube T, qui la conduit dans un tuyau SS' roulé en spirale, appelé *serpentin* et plongeant dans un vase R plein d'eau froide. Refroidie par cette eau, la vapeur se condense et le liquide provenant de cette condensation coule par l'extrémité B. Les substances solides que l'eau tenait en dissolution, n'étant pas volatiles, sont restées dans la cucurbite.

Mais la vapeur abandonnant, en se condensant, une grande quantité de chaleur latente, échaufferait bien vite l'eau du réfrigérant R, si l'on n'avait soin de faire arriver, au fond de celui-ci, un courant d'eau froide par le tube D. L'eau échauffée s'élève en vertu de sa plus faible densité et s'écoule par le trop-plein P.

228. Lorsque la chaudière contient un mélange de deux liquides volatils dont les points d'ébullition sont assez rapprochés pour qu'ils se volatilisent en même temps, on fait passer leur vapeur, avant de la conduire au serpentin, dans un appareil appelé *rectificateur*. La température y est moins élevée que dans la chaudière, de telle sorte que le liquide le moins volatil peut s'y con-

denser et retournera à la chaudière, tandis que la vapeur de l'autre marche vers le serpentin où s'opère la condensation.

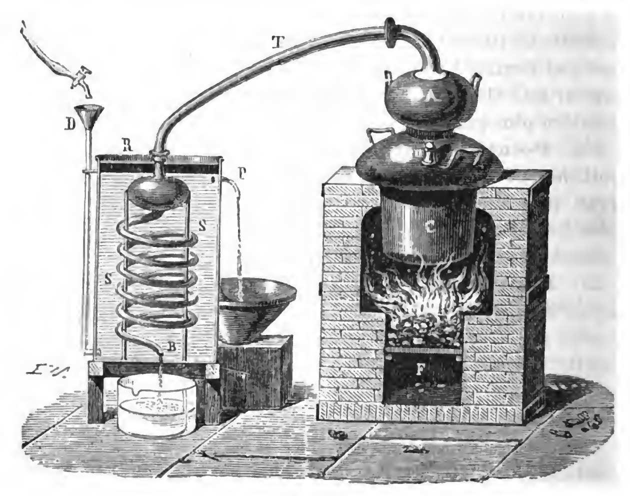



Fig. 178.

C'est sur ce principe que reposent les appareils qui servent à distiller les vins et à effectuer la séparation de l'alcool et de l'eau qu'ils renferment.

---

# CHAPITRE VI

## PROPAGATION DE LA CHALEUR. — CONDUCTIBILITÉ. RAYONNEMENT. — CALORIMÉTRIE.

229. La chaleur, dont nous venons d'examiner les principaux effets, peut se transmettre d'un corps à un autre de deux manières différentes : 1° *lentement et de proche en proche,* à travers les

molécules de milieux continus, c'est-à-dire par *conductibilité*; 2° *rapidement et à distance*, en franchissant directement l'intervalle qui sépare deux corps éloignés : on dit, dans ce dernier cas, qu'elle se propage par *rayonnement*. Nous allons étudier ces deux modes de transmission.

230. **Conductibilité.** — Lorsque, tenant une cuiller d'argent par une de ses extrémités, on plonge l'autre dans l'eau bouillante, la cuiller s'échauffe bientôt assez pour qu'il devienne impossible de la tenir plus longtemps. C'est que la chaleur de l'eau bouillante s'est transmise à la partie plongée, et, se propageant ensuite de molécule en molécule, est arrivée jusqu'à l'autre extrémité. La propriété qu'ont les corps, à un degré plus ou moins élevé, de pouvoir transmettre la chaleur de molécule à molécule, à travers leur masse, est désignée sous le nom de *conductibilité*.

231. **Conductibilité des solides.** — Les corps solides ne possèdent pas tous au même degré le pouvoir de conduire la chaleur. Tout le monde sait que lorsqu'un morceau de métal est chauffé à l'une de ses extrémités, il est impossible de le prendre à la main en aucun de ses points, tandis qu'on peut tenir un morceau de bois, même très-court, une allumette par exemple, dont une des extrémités est enflammée. C'est qu'en effet les métaux sont des corps bons conducteurs de la chaleur, tandis que le bois est mauvais conducteur.

232. **Appareil d'Ingenhousz**[1]. — L'appareil d'Ingenhousz peut servir à comparer les conductibilités des corps solides. Sur l'une des faces d'une caisse rectangulaire en laiton (fig. 179) sont implantées des tiges de même longueur et de même diamètre faites avec les substances à comparer entre elles. On plonge tous les cylindres dans un bain de cire fondue, et on les retire promptement. Quand la cire est solidifiée à la surface des tiges, on verse dans la caisse de l'eau bouillante : la chaleur pénètre dans les cylindres et fait fondre la cire qui les recouvre. On

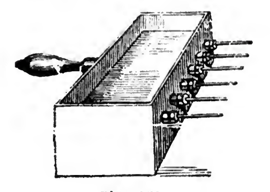


Fig. 179.

[1] Ingenhousz, médecin et physicien, né à Bréda (Hollande) en 1730, mort en 1799.

juge de la conductibilité plus ou moins grande des tiges par la distance à laquelle s'étend dans le même temps la fusion de la cire.

L'ordre des conductibilités est le suivant :

*Argent, cuivre, or, laiton, zinc, étain, fer, acier, plomb, platine.*

*Verre, marbre, porcelaine, poterie, charbon, bois.*

233. **Conductibilité des liquides.** — Quand nous avons étudié l'ébullition de l'eau, nous avons parlé des courants qui s'établissent dans une masse liquide chauffée par sa partie inférieure. Pour mettre ces courants en évidence, il suffit de faire l'expérience suivante. Une cloche de verre renversée (fig. 180) contient de l'eau dans laquelle on a mis de la sciure de bois en suspension. On la chauffe sur une petite portion de la paroi inférieure, et l'on voit les parcelles de sciure, entraînées par les courants, monter et descendre, comme l'indiquent les flèches de la figure 180.

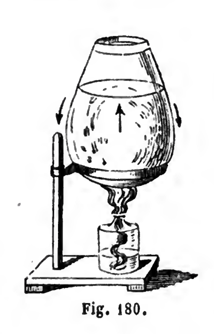


Fig. 180.

Il est évident dès lors que, pour apprécier la conductibilité des liquides, il faut se mettre à l'abri des courants dont nous venons de parler. On peut le faire en chauffant les liquides par leur partie supérieure. On a constaté ainsi que les liquides sont fort mauvais conducteurs de la chaleur.

Rumford[1] avait même nié leur conductibilité. Murray a prouvé son existence par l'expérience suivante. Après avoir creusé une cavité dans un bloc de glace, il plaça au fond un thermomètre; puis, emplissant la cavité successivement d'huile et de mercure, il approcha de la surface du liquide un corps chaud et constata une élévation de température du thermomètre. La propagation ne s'est pas faite par les parois du vase, puisque ce vase est resté à zéro; elle ne s'est pas faite directement par rayonnement, car, si on ne touche pas le liquide avec le corps chaud, l'effet est moins sensible.

[1] Comte de Rumford, physicien célèbre, né dans l'Amérique anglaise, à Rumford, en 1753, mort à Auteuil, près Paris, en 1814.

234. **Conductibilité des gaz.** — Les gaz sont encore plus mauvais conducteurs que les liquides ; leur échauffement se fait aussi par des courants intérieurs.

235. **Applications.** — Les principes que nous venons d'exposer donnent lieu à de nombreuses applications pratiques.

Certains corps paraissent froids à la main qui les touche ; les métaux, par exemple. En effet, la chaleur que la main donne à ces corps ne restant pas aux points de contact, mais se transmettant par conductibilité, la main fournira du calorique jusqu'à ce que tout le morceau de métal soit en équilibre de température avec elle. De là un grand refroidissement. Si, au contraire, elle touche un morceau de bois, la chaleur ne quittant guère les points de contact, l'équilibre est bientôt atteint en ces points.

Pour conserver la glace dans les glacières, on prend des précautions, qui reviennent toutes à l'entourer de substances peu conductrices, et, par suite, peu capables de lui transmettre la chaleur du dehors.

Quand on enveloppe un morceau de glace avec une étoffe en laine, on l'empêche de se fondre, car la laine, conduisant mal le calorifique, protége la glace contre l'action de la chaleur extérieure. Inversement, quand on veut conserver un liquide chaud dans un vase, il suffit de l'envelopper avec de la laine, qui, par sa mauvaise conductibilité, maintient la chaleur à l'intérieur du vase.

Les vêtements de laine dont nous nous couvrons pendant l'hiver ne nous apportent pas de chaleur, mais ils empêchent, par leur mauvaise conductibilité, la chaleur de notre corps de se répandre au dehors. Nous ferons remarquer que le défaut de conductibilité des substances filamenteuses provient en partie de ce qu'elles emprisonnent une couche d'air, qu'une foule de petits obstacles empêchent de se mouvoir. L'édredon dont nous recouvrons nos lits pendant l'hiver doit ses effets à sa mauvaise conductibilité et surtout à celle de l'air emprisonné entre les brins de duvet. L'emploi des doubles fenêtres repose aussi sur la mauvaise conductibilité de la couche d'air enfermée entre les deux parois.

On a fait, dans ces derniers temps, une très-ingénieuse application des principes précédents dans l'invention d'appareils destinés à cuire les aliments sous l'action continue d'un foyer de chaleur. Ces appareils, dits *de cuisine automatique*, se composent

d'une boîte en bois garnie intérieurement de substances filamenteuses recouvertes de feutre. Au centre se trouve une cavité destinée à recevoir le vase où l'on fera cuire les aliments. Pour faire le potage, on met dans un récipient en fer-blanc les substances nécessaires, eau, viande, légumes, etc., et, après les avoir fait bouillir jusqu'à formation de l'écume, on enlève celle-ci, on ferme le vase et on l'introduit dans la boîte dont nous avons parlé. On ferme avec un couvercle garni comme la boîte, et on abandonne le tout. Au bout de six à sept heures, on peut ouvrir l'appareil; la chaleur développée pendant l'ébullition s'est conservée, grâce à la mauvaise conductibilité des parois, et l'on obtient un potage encore chaud et ne différant en rien de ceux que l'on fait par les procédés ordinaires.

Cette invention a eu à l'Exposition universelle de 1867 un légitime succès.

236. **Chaleur rayonnante.** — Lorsqu'on s'approche d'une cheminée où se trouve du charbon ou du bois en ignition, on éprouve une sensation de chaleur. Si l'on place devant l'ouverture de la cheminée une bougie allumée, on voit sa flamme s'incliner vers le foyer, ce qui prouve l'existence d'un courant d'air allant de l'appartement dans la cheminée. L'existence de ce courant ne permet pas d'admettre que la chaleur soit arrivée par conductibilité de l'air, puisqu'à mesure que les molécules d'air s'échaufferaient, elles seraient emportées par le courant, sans pouvoir arriver au contact de nos organes.

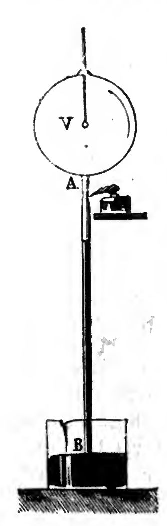


Fig. 181.

237. Rumford a, du reste, démontré d'une manière péremptoire que la chaleur peut se transmettre directement d'un corps à l'autre, sans l'intermédiaire de corps interposés. Il prenait un ballon de verre V (fig. 181), dont le centre était occupé par le réservoir d'un thermomètre, et y soudait un tube AB de 80 centimètres environ; il emplissait l'appareil de mercure comme pour en faire un baromètre, et le renversait sur une cuvette contenant aussi du mercure. Le liquide s'abais-

sait, laissant le vide au-dessus de lui; puis, à l'aide du dard du chalumeau, Rumford séparait le ballon du tube au-dessus du niveau du mercure. Plongeant alors le ballon dans l'eau chaude (fig. 182), il voyait le thermomètre indiquer instantanément une élévation de température; ce qui prouve que la chaleur de l'eau chaude (chaleur qui n'est accompagnée d'aucun dégagement de lumière et que l'on nomme, pour cela, chaleur obscure) traverse le vide barométrique.

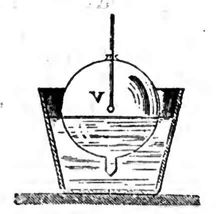


Fig. 182.

La chaleur lumineuse du soleil jouit, du reste, évidemment de la même propriété, puisque, avant d'arriver dans les limites de l'atmosphère qui enveloppe la terre, elle a traversé les espaces interplanétaires où il n'existe aucune matière pondérable.

La transmission directe de la chaleur est dite transmission *par rayonnement.*

238. **Dans un milieu homogène, la chaleur rayonnante se transmet d'un point à un autre en suivant une ligne droite.** — Soit en S une source de chaleur (fig. 183), en T la boule d'un thermomètre, toutes deux très-petites. Le thermomètre recevant la chaleur que lui envoie la source indique une élévation de température; mais si l'on interpose dans un des points de la ligne ST un écran en carton ou en métal le thermomètre revient aussitôt à la température de l'air ambiant, ce qui prouve que la chaleur de la source S ne lui arrive plus. L'écran interposé en tout autre point de l'espace n'empêche pas la chaleur d'arriver en T; donc la chaleur suit la ligne droite ST pour aller de S en T et pas d'autre. La ligne droite suivie par la chaleur dans sa propagation est appelée *rayon calorifique.*

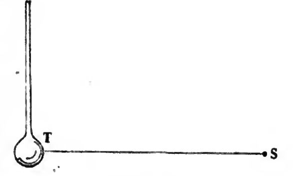


Fig. 183.

239. **Émission de la chaleur rayonnante.** — Lorsqu'un corps se refroidit, on reconnaît que le temps qu'il met à s'abaisser d'un certain nombre de degrés dépend de la nature de sa surface. Rumford prenait, pour le prouver, deux vases cylindriques, sus-

pendus par des fils ou reposant sur trois pointes en bois, de manière que la chaleur ne pût se perdre par conductibilité du support. Ces vases étaient remplis d'eau bouillante. La surface latérale de l'un était nue, celle de l'autre recouverte d'une toile fine; un thermomètre, plongé dans chacun, indiquait la température de l'eau qu'il contenait. Ayant versé de l'eau à la même température dans les deux cylindres, Rumford constata que le vase nu se refroidissait beaucoup plus vite que le vase recouvert de toile, ce qui indiquait évidemment qu'il rayonnait plus de chaleur vers l'espace environnant. Ayant recouvert l'un des cylindres de substances différentes, il reconnut que, dans des conditions identiques, la vitesse de refroidissement variait avec la nature de la substance.

240. **Pouvoirs émissifs.** — On nomme *pouvoir émissif* d'un corps la faculté plus ou moins grande qu'il possède de rayonner de la chaleur au dehors.

Les physiciens ont déterminé, par des procédés que nous ne décrirons pas ici, les pouvoirs émissifs des différents corps. MM. de la Provostaye et P. Desains ont apporté dans ces recherches une grande précision. Nous indiquerons les résultats auxquels ils sont arrivés.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Noir de fumée......... | 1 | Argent vierge........ | 0,1309 |
| Colle de poisson....... | 0,91 | Argent bruni......... | 0.0255 |
| Gomme laque......... | 0,62 | Platine laminé....... | 0,112 |

On voit que les métaux ont un très-faible pouvoir émissif, c'est ce qui explique pourquoi la vaisselle métallique conserve aussi bien la chaleur des aliments.

Nous ferons aussi remarquer que l'emploi de tubes en cuivre poli, comme tuyaux de poêles ou de cheminées, donne lieu à une émission de chaleur moins grande que l'emploi de tuyaux en tôle noircie.

241. La quantité de chaleur émise par un corps est d'autant plus grande que la température du corps rayonnant surpasse davantage celle du milieu ambiant.

Du reste, le refroidissement d'un corps est un phénomène très-complexe; il ne dépend pas seulement de la température, mais de la nature de l'espace environnant.

212. **Réflexion de la chaleur rayonnante.** — Lorsque la chaleur rayonnante tombe sur un corps dont la surface est polie elle éprouve un changement de direction qui la rejette en avant de ce corps. On dit alors que la chaleur s'est réfléchie. Soit un rayon calorifique AB (fig. 184) tombant sur une surface parfaitement polie MN ; il est renvoyé par la surface dans la direction BC. Or, si l'on élève une perpendiculaire BP à la surface au point d'incidence B, on constate par l'expérience que : 1° *les deux plans* APB *et* PBC *coïncident* ; 2° *l'angle d'incidence* ABP *est égal à l'angle de réflexion* PBC.

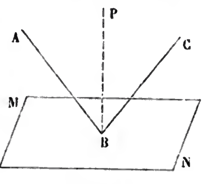


Fig. 184.

Nous n'insisterons pas sur la démonstration expérimentale de ces lois ; nous indiquerons cependant comment on arrive à se convaincre de leur exactitude, en comparant les effets de la chaleur réfléchie à ceux de la lumière réfléchie.

Nous verrons plus tard que si l'on dispose en face l'un de l'autre deux miroirs sphériques concaves AA', BB' (fig. 185), de manière que les centres C, C' des sphères, dont ils sont censés faire partie, soient sur une ligne passant par les points milieux M, M' de leurs surfaces ; qu'en un point F de cette ligne, milieu du rayon de AA' passant par F, on dispose la flamme d'une bougie, les rayons lumineux qui en sortent se réfléchissent sur AA' parallèlement à la ligne des centres, vont ensuite tomber sur BB', qui les réfléchit à son tour, de manière qu'ils aillent passer par F', milieu de la ligne M'C'.

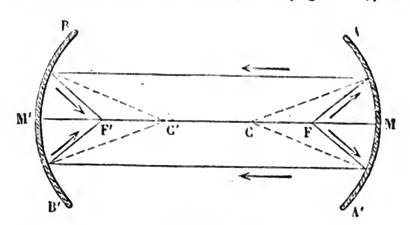


Fig. 185.

Or, au point F', on peut recevoir sur un écran l'image très-nette et très-brillante de la bougie. Ce fait est une conséquence des lois de la réflexion de la lumière qui sont identiques à celles que nous avons énoncées plus haut pour la chaleur. Mais si l'on remplace l'écran en F' par un thermomètre, on constate une élé-

vation sensible de température, ce qui conduit à admettre pour la chaleur les mêmes lois de réflexion que pour la lumière.

Pour rendre la démonstration plus frappante, on dispose souvent en F une grille contenant des charbons incandescents, on

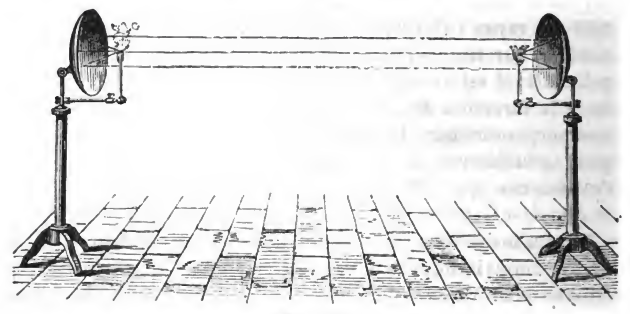


Fig. 186.

peut alors en F′ allumer de l'amadou, et comme le morceau d'amadou commence à norcir du côté de BB′, on en conclut que c'est bien la chaleur réfléchie qui est cause de son inflammation (fig. 186).

243. **Pouvoirs réflecteurs.** — Tous les corps n'ont pas au même degré le pouvoir de réfléchir la chaleur, et on nomme *pouvoir réflecteur* d'une surface polie le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.

MM. Hervé de la Provostaye[1] et Paul Dessains sont arrivés aux résultats suivants :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Argent | 0,96 | Acier | 0,84 |
| Or | 0,95 | Platine | 0,83 |
| Cuivre | 0,93 | Zinc | 0,91 |
| Laiton | 0,75 | Fer | 0,77 |

244. **Diffusion de la chaleur.** — Les substances non polies ne réfléchissent pas les rayons calorifiques dans une direction unique et déterminée ; elles les rejettent dans toutes les directions ; on dit alors qu'elles *diffusent* la chaleur.

245. **Transmission de la chaleur rayonnante à travers**

[1] Hervé de la Provostaye, physicien français, né à Redon en 1812, mort à Paris en 1863.

**les substances dites diathermanes.** — De même que la lumière peut passer à travers certaines substances qui sont dites transparentes, de même la chaleur peut aussi traverser certaines substances dites *diathermanes*. Les physiciens ont déterminé pour un certain nombre de substances le rapport entre la quantité de chaleur transmise et la quantité de chaleur incidente. Ils ont trouvé que le sel gemme laisse passer les 0,92 de la chaleur qu'il reçoit, quelle que soit la nature de la source d'où partent les rayons; que, pour d'autres substances, la proportion de chaleur transmise variait avec la nature de la source et avec celle du corps diathermane.

246. **Absorption de la chaleur rayonnante.** — Lorsque la chaleur rayonnante tombe sur un corps, elle peut, indépendamment des phénomènes de réflexion, de diffusion et de diathermanéité dont nous venons de parler, être en partie absorbée par le corps et déterminer une élévation de température.

Les corps n'ont pas tous au même degré la faculté d'absorber la chaleur, et on nomme *pouvoir absorbant le rapport qui existe* entre la quantité de *chaleur absorbée* et la quantité de *chaleur incidente*. Il est évident, d'ailleurs, que plus le pouvoir réflecteur d'une substance est grand, plus son pouvoir absorbant est petit, puisque la réflexion rejette une partie de la chaleur incidente et l'empêche d'entrer dans l'intérieur de cette substance. C'est ainsi que les métaux ont un faible pouvoir absorbant, tandis que les substances mates, telles que le blanc de céruse, le papier, dont le pouvoir réflecteur est nul, absorbent toute la chaleur incidente qu'ils ne diffusent pas; le noir de fumée absorbe à peu près intégralement toute espèce de chaleur incidente.

247. Lorsqu'on veut qu'un corps s'échauffe rapidement, il faut le recouvrir d'une substance dont le pouvoir absorbant soit considérable, de noir de fumée, par exemple; si l'on veut, au contraire, qu'il ne s'échauffe pas, on le recouvrira d'un métal poli.

Nous portons des vêtements blancs pendant l'été, parce qu'ils absorbent très-peu la chaleur du soleil.

248. **Équilibre mobile de température.** — Lorsque deux corps A et B de températures différentes sont en présence l'un de l'autre, ils rayonnent de la chaleur l'un vers l'autre jusqu'à ce qu'il y ait égalité de température. Le corps le plus chaud A se refroidit, non parce que l'autre B lui envoie du froid, mais parce

qu'il reçoit de B moins de chaleur qu'il ne lui en envoie. On admet que, lorsque A et B ont atteint la même température, ils continuent à rayonner l'un vers l'autre ; mais chacun recevant alors autant de chaleur qu'il en émet, sa température reste fixe. Cet échange est désigné sous le nom d'équilibre mobile de température.

249. Ce qui précède nous explique pourquoi nous ressentons les variations de la température ambiante : lorsque la température de l'atmosphère et des objets placés au milieu d'elle est basse, notre corps rayonne vers eux plus de chaleur qu'il n'en reçoit, et il en résulte une sensation de froid. Lorsqu'au contraire cette température est élevée, nous recevons des corps extérieurs plus de chaleur que nous n'en rayonnons et nous éprouvons une sensation de chaud.

## CALORIMÉTRIE. — CHALEURS SPÉCIFIQUES.

Nous avons souvent parlé, dans tout ce qui précède, de quantités de chaleur, mais nous n'avons pas encore fixé l'unité choisie pour les mesurer. Les physiciens ont pris pour *unité de chaleur* la quantité de chaleur qu'il faut donner à l'unité de poids d'eau pour élever sa température de 0° à 1°; ils la désignent sous le nom de *calorie.*

250. **Chaleur spécifique.** — L'expérience nous apprend que pour faire subir à des poids égaux de diverses substances une même élévation de température, il faut leur donner des quantités de chaleur différentes. Les divers corps ne se comportent donc pas de la même manière vis-à-vis de la chaleur, et nous appellerons *chaleur spécifique* d'un corps la quantité de chaleur, exprimée en calories, nécessaire pour élever de 0° à 1° l'unité de poids du corps.

Puisque la calorie ou unité de chaleur est la quantité de chaleur qu'il faut donner à l'unité de poids d'eau pour élever sa température de 0° à 1°, on voit que ce qui précède revient à dire que la chaleur spécifique de l'eau est prise pour unité, et qu'on rapporte à cette unité les chaleurs spécifiques des autres corps.

Dire que la chaleur spécifique du fer est 0,1138, c'est dire que, s'il faut à l'unité de poids d'eau, le kilogramme par exemple, une calorie pour s'élever de 0° à 1°, il faudra à 1 kilogramme de fer $0^{cal}$, 1138.

251. **Méthode des mélanges.** — Pour déterminer la chaleur spécifique d'un corps, on peut employer la méthode des mélanges, dont nous allons exposer le principe.

On admet : 1° que la quantité de chaleur perdue par un corps en s'abaissant de 25°, par exemple, est égale à celle qu'il faudrait lui donner pour élever sa température de 25° ; 2° que, lorsqu'on mélange deux corps de températures inégales, il s'établit, au bout d'un certain temps, une température uniforme et que la quantité de chaleur gagnée par le corps qui s'est échauffé est égale à celle qu'a perdue le corps qui s'est refroidi.

Cela posé, supposons qu'on plonge un morceau de fer du poids de 60 grammes et chauffé à 100° dans une masse d'eau dont le poids est de 112 grammes et la température 10°. Le fer échauffe l'eau et la température finale du mélange est de 15°. On propose de calculer la chaleur spécifique du fer. Il est évident que si nous appelons $x$ la chaleur spécifique du fer, 1 gramme de fer, pour se refroidir de 1°, perd $x$ calories; 60 grammes perdent soixante fois $x$, et pour se refroidir de 100 à 15°, c'est-à-dire de 85°, il perd quatre-vingt-cinq fois plus, ou 5100 $x$. Cette chaleur perdue a été donnée à l'eau : or 112 grammes d'eau, pour s'élever de 1°, ont besoin de 112 calories, et pour s'élever de 10 à 15° ou de 5°, de cinq fois 112 calories, c'est-à-dire 560 ; donc 5100 fois $x$ étant égal à 5600, $x$ sera égal à $\frac{5600}{5100}$ ou 0,1.

TABLEAU DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DE QUELQUES CORPS.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eau................ | 0 | Acier............... | 0,0562 |
| Zinc................ | 0,0955 | Verre............... | 0,1976 |
| Fer................ | 0,1138 | Mercure............ | 0,0333 |
| Cuivre.............. | 0,0951 | Laiton.............. | 0,0939 |
| Argent............. | 0,0575 | Soufre.............. | 0,2025 |
| Plomb.............. | 0,0314 | | |

252. **Chaleur latente.** — Nous avons vu plus haut que la chaleur latente de la glace était égale à 79,2, cela revient à dire que, pour fondre l'unité de poids de glace, il faut lui donner 79,2 calories, c'est-à-dire autant de chaleur que pour élever la même unité de poids d'eau de 0° à 79°,2.

# CHAPITRE VII

## CHAUFFAGE ET VENTILATION DES APPARTEMENTS. MACHINES A VAPEUR.

Nous nous occuperons dans ce chapitre : 1° des différents moyens usités pour le chauffage et la ventilation des appartements; 2° des machines à vapeur employées dans l'industrie. Nous trouverons dans cette double étude l'application des principes que nous avons posés dans les chapitres précédents.

### CHAUFFAGE ET VENTILATION DES APPARTEMENTS.

253. Lorsqu'un appartement est habité par un certain nombre de personnes, l'air s'y altère et devient incapable, au bout d'un certain temps, de servir à la respiration, par suite de la disparition d'une certaine quantité d'oxygène absorbée dans l'acte respiratoire et de la production de matières organiques appelées miasmes.

On admet en général qu'une personne peut vicier 6 mètres cubes d'air par heure et que, par suite, il faut, dans un lieu habité, introduire par heure et par personne 6 mètres cubes d'air destiné à remplacer le même volume d'air expulsé. Quand l'appartement est éclairé par des lampes, bougies, ou becs de gaz, la combustion des corps produisant l'éclairage donne lieu à un dégagement considérable d'acide carbonique et par suite le renouvellement de l'air doit encore être plus actif. Le nombre de mètres cubes d'air à introduire en plus varie suivant la nature et le nombre des sources de lumière.

Il est donc important, au point de vue de l'hygiène, de renouveler continuellement l'air des appartements pour enlever l'air vicié et ramener au dedans l'air pur du dehors. Pendant l'été, ce renouvellement de l'air désigné sous le nom de *ventilation* se fait de lui-même, parce qu'on tient ordinairement ou-

vertes les portes et les fenêtres. Pendant l'hiver, où l'on est obligé de les maintenir fermées pour se préserver du froid extérieur, la ventilation des appartements se fait, en même temps que le chauffage, par différents systèmes dont nous allons étudier le principe.

254. **Des divers appareils de chauffage.** — Les divers appareils de chauffage employés se divisent en cinq espèces principales :

1° Les cheminées ordinaires;

2° Les poêles;

3° Les calorifères à air chaud;

4° Les appareils à circulation d'eau;

5° Les appareils à vapeur.

255. **Cheminées.** — Dans ce mode de chauffage, qui est le plus ancien et le plus répandu, le combustible brûle dans un foyer découvert au contact de l'air. Un long conduit appelé cheminée est en communication avec le foyer et s'élève au-dessus de lui. Quand l'air de la cheminée et celui de l'appartement sont à une même température, une couche d'air, considérée à la partie inférieure du foyer, supporte des pressions égales de bas en haut et de haut en bas, et par suite reste immobile. Dès qu'on allume du feu dans le foyer, l'air de la cheminée s'échauffe, se dilate, devient moins dense, et par suite s'élève dans la cheminée. Il en résulte un vide partiel que l'air de l'appartement vient combler en entrant dans la cheminée, où il active la combustion et où il s'élève lui-même, tandis qu'il est remplacé dans l'appartement par de nouvelles couches venues du dehors. Ce mouvement de l'air est désigné sous le nom de *tirage*. On voit que, dans ce mode de chauffage, on n'utilise que la chaleur rayonnée par le combustible, et, comme l'air est diathermane, il ne s'échauffera sensiblement que lorsque les murs et les objets situés dans l'appartement auront absorbé une certaine quantité de chaleur qu'ils rendront ensuite par contact à l'atmosphère. Remarquons de plus qu'une grande quantité de chaleur est perdue par le tirage de la cheminée. Aussi, pour ce double motif, ce mode de chauffage est le moins économique de ceux qu'on peut employer; mais, dans la vie habituelle, l'usage des cheminées est beaucoup plus favorable à la santé, pour la ventilation, que celui des autres appareils connus.

« L'agrément que présente l'aspect d'un bon feu, dit M. le général Morin dans ses *Études sur la ventilation*, la facilité qu'il

donne de se chauffer momentanément, sont sans doute les motifs qui, dans la vie privée, peuvent faire préférer les cheminées aux autres moyens de chauffage ; mais elles exigent des soins d'ordre, de propreté, de prudence, qu'on ne peut toujours observer dans les lieux de réunion, dans les hôpitaux, les écoles... Et l'économie ne permet guère, en France, d'en conseiller l'usage pour les établissements publics. »

256. **Conditions d'un bon tirage.** — Pour que le tirage d'une cheminée se fasse de manière à pouvoir entretenir la combustion, ventiler l'appartement et donner un libre écoulement à la fumée et autres produits de la combustion, elle doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° Il faut que la cheminée ait une hauteur suffisante, 5 mètres au moins. Comme l'air chaud s'élève dans la cheminée en vertu de la poussée qu'exerce sur lui l'air plus froid de l'appartement, il est évident que la force ascensionnelle de l'air chaud, qui est la cause du tirage, est égale à la différence entre le poids de l'air chaud de la cheminée et le poids d'un égal volume d'air froid ; cette différence est d'autant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que la colonne d'air chaud est plus longue, c'est-à-dire que la cheminée est plus haute. Dans les usines, où l'on a besoin d'un fort tirage, on construit des cheminées dites *cheminées à vapeur*, qui s'élèvent d'autant plus haut que le tirage doit être plus actif. On peut en voir une à Manchester qui a 125 mètres de haut.

2° Il faut qu'une cheminée n'ait pas une trop grande largeur, pas plus de 3 à 4 décimètres carrés de section. Lorsque sa section est trop grande, il peut s'établir par le haut un courant descendant d'air froid qui ralentit la vitesse du courant ascendant et peut, en le faisant refluer dans l'appartement, y occasionner de la fumée.

3° L'ouverture de la cheminée dans l'appartement ne doit pas avoir une trop grande étendue, et surtout pas trop de hauteur au-dessus du foyer ; car, alors, une grande partie de l'air qui entre dans la cheminée, passant au-dessus du combustible à une certaine distance, ne peut s'y échauffer, et par suite le tirage se trouve diminué. Il faudrait, autant que possible, que tout l'air froid appelé par le tirage traversât le combustible avant de se rendre dans le canal d'ascension. C'est pour cela que Rumford a

conseillé de n'employer que des cheminées dont l'orifice inférieur est rétréci par trois cloisons obliques convergeant vers le foyer (fig. 187). Ces parois obliques ont de plus l'avantage de réfléchir vers l'appartement une partie de la chaleur qui sans elles n'y arriverait pas.

On ajoute aussi maintenant, et toujours, dans le but de pouvoir

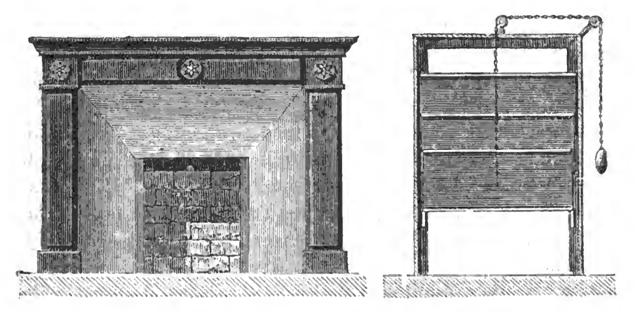


Fig. 187. Fig. 188.

augmenter le tirage, un tablier mobile en tôle qui permet de rétrécir à volonté l'orifice de la cheminée (fig. 188).

4° Il faut que la ventilation soit suffisante dans l'appartement, c'est-à dire que celui-ci ne soit pas trop bien clos pour empêcher la rentrée de l'air extérieur.

5° Enfin il est bon de surmonter la cheminée d'un chapeau cylindrique percé à froid de trous nombreux dont les bavures, dirigées vers l'extérieur, empêchent le vent, quelle que soit sa direction, de s'engouffrer dans la cheminée et de refouler la fumée jusque dans l'intérieur de l'appartement.

257. **Poêles.** — Les poêles, dont la construction est si variée et connue de tous, offrent des défauts et des qualités inverses de ceux que présentent les cheminées. Ils chauffent bien, sont économiques, mais ventilent mal.

Les poêles chauffent non-seulement par la chaleur qu'ils rayonnent, mais aussi par celle qu'ils cèdent par contact aux couches d'air qui les enveloppent et se renouvellent autour d'eux. Le tirage auquel ils donnent lieu n'est pas assez actif pour que la ventilation se fasse d'une manière convenable, et pour qu'une partie

des produits de la combustion ne reste pas dans l'appartement.

258. **Poêles-calorifères.** — Nous citerons encore les poêles-calorifères, dont la nature est très-variée, mais qui reviennent pour la plupart à un foyer central entouré d'une enveloppe, dans laquelle l'air extérieur se trouve appelé et s'échauffe pour se répandre ensuite dans l'appartement. L'air fourni par ces appareils est souvent trop chaud, et, comme la combustion n'exige qu'une quantité d'air relativement faible, la ventilation ne s'effectue pas dans les meilleures conditions.

259. **Calorifères à air chaud.** — Le foyer de ces appareils de chauffage est toujours placé, soit dans les caves, soit dans les salles inférieures à celles qui doivent être chauffées. Tantôt l'air extérieur traverse des tuyaux métalliques portés à une haute température, s'y échauffe et se répand de là dans les appartements; tantôt cet air ne s'échauffe qu'au contact de tuyaux parcourus, à l'intérieur et en sens inverse, par l'air ayant déjà servi à la combustion.

Ces appareils présentent l'avantage d'une installation facile. Mais ce chauffage n'est pas exempt d'inconvénients au point de vue de la salubrité. Ces inconvénients proviennent : 1° de la température élevée de l'air, qui, lorsque l'alimentation n'est pas régulière, passe souvent de 30° à 40° jusqu'à 60°, 80° et même 100° près des bouches ; 2° du passage de l'air sur des surfaces métalliques fortement chauffées, en présence desquelles la décomposition des matières organiques s'effectue et peut donner lieu à une odeur désagréable.

On remédie en partie à ces inconvénients en joignant à ce mode de chauffage l'usage des cheminées ordinaires ou même de simples cheminées d'évacuation.

Quant à la dépense, M. le général Morin, auquel nous empruntons une partie de ces données techniques, ne pense pas que l'économie soit aussi grande qu'on l'a souvent prétendu.

260. **Calorifères à circulation d'eau chaude.** — Ce mode de chauffage, pour lequel Bonnemain prit un brevet d'invention en 1777, repose sur le principe suivant : Soit une chaudière A (fig. 189) pleine d'eau froide, portant à sa partie supérieure un conduit BCDE qui, après s'être élevé au-dessus d'elle, redescend et vient la rejoindre à sa partie inférieure E. Ce conduit est plein d'eau. Si l'on chauffe la chaudière A, l'eau deve-

nant moins dense s'élève dans le conduit, l'eau froide de DE descend et vient s'échauffer dans la chaudière. Il en résulte une circulation continue, pendant laquelle l'eau chaude de l'appareil cède de la chaleur aux parois du conduit; cette cession amène chez elle un refroidissement, et par suite une augmentation de densité dont l'effet est de la faire retourner dans la chaudière A, où elle s'échauffe de nouveau. Ces appareils ont reçu bien des modifications; nous nous contenterons de décrire celui que M. L. Duvoir-Leblanc a construit dans plusieurs grands établissements.

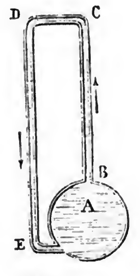


Fig. 189.

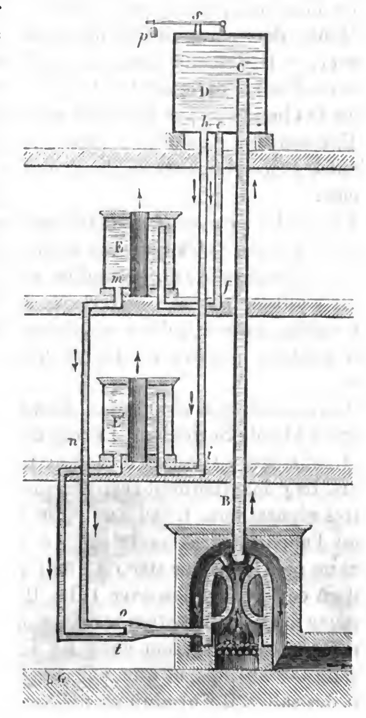


Fig. 190.

On installe dans les caves de l'édifice une chaudière en forme de cloche à foyer intérieur. La figure 190 montre la flamme du combustible et le trajet que suivent les gaz provenant de la combustion. Ces gaz, après avoir léché les parois de la cloche renfermant l'eau, qui est représentée par des hachures horizontales, s'échappent au dehors par des conduits latéraux. L'eau échauffée

dans la chaudière devient plus légère et s'élève par un tuyau BC jusque dans un réservoir D placé à la partie supérieure de l'édifice. De ce réservoir partent des tubes *ef*, *hi*, en nombre égal à celui des appartements à chauffer. Chacun de ces tubes se rend dans un *poêle d'eau*, c'est-à-dire dans un récipient clos, en fonte, disposé au milieu de l'appartement. L'eau chaude du réservoir D descend dans les poêles E, E' qu'elle échauffe : après s'être refroidie et être devenue plus dense, elle redescend dans la chaudière par les tubes *m n o* et *t*.

Une soupape de sûreté S placée en haut du réservoir D prévient les inconvénients résultant de l'accumulation de la vapeur d'eau.

Les poêles à eau sont ordinairement traversés de part en part par des tuyaux vides qui sont entourés d'eau et dans lesquels passe et s'échauffe l'air des salles ou même l'air extérieur qui peut y affluer par des ouvertures spéciales. Cette disposition, en même temps qu'elle augmente la surface de chauffage des poêles, permet en même temps l'introduction de l'air pur.

Les calorifères à circulation d'eau chaude sont employés à Paris à l'École Normale, à l'École des Mines, à l'École des Ponts et Chaussées, au Conseil d'État, au Conservatoire des arts et métiers. Ils y fonctionnent régulièrement et n'exigent que de très-rares réparations. L'eau contenue dans la chaudière et dans tout l'appareil y est maintenue à une température modérée qui ne peut dépasser 100°, attendu que le récipient supérieur est en communication avec l'air. Il en résulte que l'air n'éprouve aucune altération sensible, que sa température, au moment de l'introduction dans les salles, est toujours limitée à 40° ou 50° au plus, et que, par conséquent, en se mêlant à celui des salles, il y produit un mélange salubre. Le seul reproche qu'on puisse faire à ces appareils, c'est la complication de la circulation des tuyaux sous les planchers, dans les épaisseurs des murs.... Mais cette complication est bien diminuée maintenant, et, en tous cas, elle est moindre que celle des appareils à circulation de vapeur.

Ce chauffage est économique. Il résulte de calculs approximatifs faits par M. Morin, qu'à l'hôpital Lariboissière, pour chauffer une capacité de 23000 mètres cubes, on ne doit dé-

penser que 122 kilogrammes de charbon par jour. Les frais de ventilation ne sont pas compris dans ce prix.

261. **Chauffage à la vapeur.** — Le principe de ce mode de chauffage est fort simple. De la vapeur d'eau, produite dans une chaudière spéciale ou fournie par une machine à vapeur dans laquelle elle a servi de moteur, se répand dans des tuyaux où elle se condense, en abandonnant à l'enceinte voisine la chaleur latente qu'elle possède. L'eau provenant de la condensation est reportée à la chaudière par des tuyaux métalliques. La rapidité avec laquelle la vapeur peut se mouvoir sous de très-faibles différences de pression, la quantité considérable de chaleur latente abandonnée, les faibles dimensions qu'il suffit de donner aux tuyaux, sont des avantages réels.

On reproche cependant à ce mode de chauffage plusieurs inconvénients qui en ont beaucoup restreint les applications.

Les fuites de vapeur sont difficiles à éviter. De plus, il faut remarquer que, dès que le feu et par suite la pression dans la chaudière diminuent d'une manière notable, il s'ensuit immédiatement un refroidissement, qui est bien plus longtemps à se produire dans les appareils à eau chaude. Mais il est un inconvénient plus grave encore. Lorsque le chauffeur, après un ralentissement du feu ou son extinction, le ranime et rétablit la pression dans la chaudière, la vapeur se précipite dans les conduits, dès que la communication est ouverte, y rencontre l'eau de condensation, qui les remplit en certains endroits et y détermine des chocs très-dangereux. Si l'on ajoute à ces inconvénients celui de réparations fréquentes, de dépense considérable de combustible, on concevra que ce mode de chauffage ne doit être employé que dans des cas restreints, lorsque, par exemple, la vapeur produite pour un autre usage peut être utilisée au chauffage.

## MACHINES A VAPEUR.

262. Les applications de la vapeur d'eau comme force motrice sont tellement importantes et tellement nombreuses qu'il ne sera pas inutile, avant d'étudier les machines que nous possédons actuellement, de jeter un coup d'œil sur les principales inventions qui, de perfectionnements en perfectionnements,

ont conduit à la solution d'un problème si important pour les progrès de l'industrie.

Nous avons vu (210) comment Salomon de Caus avait le premier indiqué, en 1625, la vapeur d'eau comme pouvant agir par pression pour produire l'élévation de l'eau. Le marquis de Worcester publia en Angleterre, en 1663, un ouvrage dans lequel il parle aussi d'un moyen qu'il a inventé pour élever l'eau par la pression de la vapeur. Denis Papin est le premier qui ait eu l'idée, en 1690, de faire agir la vapeur sur un piston destiné à recevoir sa pression et à l'employer à vaincre une résistance.

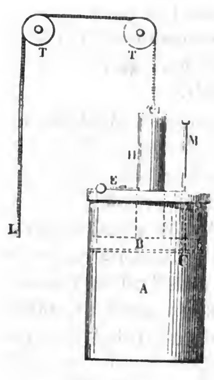


Fig. 191.

Un cylindre A (fig. 191) contient un piston B qui peut se mouvoir dans toute sa longueur. On verse au fond du cylindre une couche d'eau avant d'introduire le piston, puis on descend celui-ci jusqu'au contact de cette couche; un trou percé en C permet à l'air de s'échapper ; ce trou est ensuite fermé avec une tige M. On fait alors du feu sous le cylindre; l'eau se vaporise, et la force élastique de la vapeur soulève le piston jusqu'en haut du cylindre. Si on l'arrête dans cette position à l'aide d'un cliquet E, et qu'on éteigne le feu, la vapeur se condense, et, dès qu'on retire le cliquet, la pression atmosphérique fait descendre le piston et peut alors soulever un poids attaché à l'extrémité d'une corde ou chaîne L qui passe sur les poulies T.

C'est sur le principe précédent qu'a été construite la première machine à vapeur qui ait rendu de véritables services à l'industrie, celle de Newcommen[1], que l'on désigne sous le nom de machine atmosphérique. Le progrès qu'elle réalisa fut de permettre de ne pas laisser éteindre le feu et d'avoir toujours de la vapeur prête à agir sur le piston.

263. **Machine de Newcommen.** — Une chaudière A (fig.

[1] Newcommen, serrurier de Darmouth, inventa en 1695 la machine qui porte son nom.

192), chauffée par un feu continu, communique avec le cylindre B par un tuyau à robinet dont la tête *a* est une espèce de roue. Le piston C est relié, au moyen d'une chaîne, à un balancier D dont l'autre extrémité porte une seconde chaîne suspen-

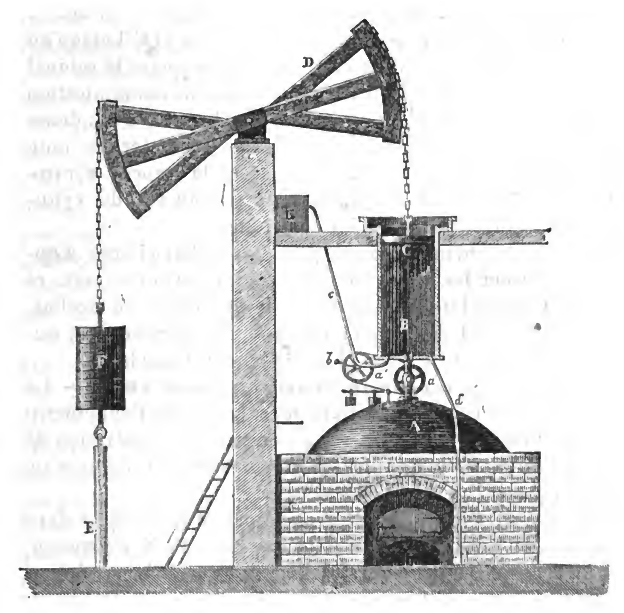



Fig. 192.

dant un poids F. A ce poids est attachée la tige maîtresse E d'une pompe qui sera mise en mouvement par la machine. Dès que le robinet *a* est ouvert, la vapeur s'introduit sous le piston et le soulève ; lorsqu'il est arrivé à la partie supérieure de sa course, si l'on ferme le robinet *a* et qu'on produise la condensation de la vapeur dans le cylindre, la pression atmosphérique pesant sur la face supérieure du piston le fait redescendre et par suite fait monter la tige E de la pompe. On conçoit facilement que plus la surface du piston sera grande, plus la résistance vaincue pourra être considérable.

Pour produire la condensation de la vapeur, on emploie le procédé suivant : un réservoir d'eau G est mis en communication par un tube *c* avec la partie inférieure du corps de pompe. Ce tube porte un robinet dont la tête est une roue *a'* qui peut être mise en mouvement par une manivelle *b* mue à la main. Une courroie sans fin passe sur les deux roues *a* et *a'*. Lorsqu'on veut produire la condensation de la vapeur, on ouvre le robinet *a'*, la courroie sans fin fait tourner *a* et ferme la communication avec la chaudière. L'eau descend alors par le tube *c*, condense la vapeur, et le piston descend. Pour le faire monter de nouveau, on ferme *a'*, par suite on ouvre *a*, et la vapeur s'introduit dans le cylindre. Un tuyau *d*, qui arrive au bas du cylindre, sert à l'évacuation de l'eau accumulée.

Plus tard, un enfant, nommé Potter, qui était chargé d'ouvrir et de fermer les robinets *a* et *a'*, voulut s'éviter ce soin et en charger la machine elle-même. Il le fit à l'aide de ficelles, qui, attachées aux balanciers et aux robinets, fermaient et ouvraient alternativement ceux-ci par le jeu de la machine.

264. **Machine à vapeur de Watt, à simple effet.** — La machine de Newcommen, malgré tous les perfectionnements apportés à l'idée de Papin, ne servait encore qu'à l'élévation de l'eau. Elle devait bientôt, entre les mains de Watt[1], devenir un moteur universel.

Le dernier perfectionnement apporté par Watt consiste dans l'invention du condenseur. Dans la machine de Newcommen, l'injection d'eau froide au-dessous du piston a pour inconvénient de refroidir à chaque fois le cylindre, et, par suite, la vapeur qui arrive à nouveau de la chaudière se condense jusqu'à ce que le cylindre ait repris une température suffisamment élevée. Watt remédia à ce défaut en liquéfiant la vapeur dans un espace séparé. Pour cela, il s'appuya sur le principe suivant :

*Lorsque deux espaces inégalement chauds sont en communication, la vapeur que contient le plus chaud se précipite dans le plus froid et acquiert bientôt partout une tension correspondante à la température de la partie la plus froide.* Supposons donc que, lorsque le piston est arrivé en haut de sa course, la partie inférieure du corps de pompe soit mise en communication avec un espace

[1] Watt, habile mécanicien, né en 1736 à Greenock, en Écosse, mort en 1819.

appelé *condenseur*, dans lequel arrive constamment l'eau froide d'un grand réservoir ; la vapeur se précipitera dans cet espace, s'y condensera en partie, et celle qui échappera à la liquéfaction ne conservera que la tension correspondant à la température du condenseur. Le piston, poussé par la pression atmosphérique, descendra donc jusqu'au fond du corps de pompe, pour remonter ensuite sous l'action de la vapeur arrivant à nouveau de la chaudière.

L'eau de condensation et l'air qui se dégage de l'eau injectée sont enlevés continuellement par une pompe nommée *pompe à air*. Cette pompe est mise en mouvement par la machine elle-même, ce qui occasionne une dépense de force et par suite une perte de vapeur ; mais cette perte est beaucoup plus petite que celle que l'on évite par l'emploi du condenseur. On conçoit facilement que si l'on n'enlevait pas cet air, il acquerrait bientôt une force élastique qui s'opposerait à la descente du piston.

Nous nous bornerons à ces indications sur la machine à simple effet, de Watt, qui est maintenant fort peu employée.

265. **Machine à vapeur à double effet de Watt.** — Pour que la machine à vapeur pût devenir un moteur universel, il était nécessaire qu'il n'y eût pas d'intermittence dans son mouvement. Pour cela il fallait que le piston fût constamment poussé par la vapeur ; c'est ce qu'a parfaitement compris l'illustre Watt et ce qu'il a réalisé de la manière la plus heureuse dans sa machine à double effet. Cette machine est le type des machines à vapeur de formes diverses qu'emploie maintenant l'industrie, ainsi que des appareils moteurs des bateaux à vapeur et des locomotives.

Dans la machine à double effet, la vapeur vient agir successivement sur la face supérieure et sur la face inférieure du piston. Pour cela le cylindre est fermé à ses deux extrémités et la tige du piston traverse le fond supérieur en passant dans une boîte à étoupes, qui empêche la vapeur de se perdre au dehors.

Pour distribuer la vapeur, c'est-à-dire pour la faire agir successivement sur les deux faces du piston, on emploie la disposition suivante :

A côté du corps de pompe se trouve une cavité F G appelée *boîte à vapeur* (fig. 193) qui reçoit la vapeur venant de la chau-

dière : par les conduits *a* et *b* elle peut être mise en communication avec la partie supérieure ou avec la partie inférieure du corps de pompe : d'autre part elle peut communiquer avec l'atmosphère par un conduit perpendiculaire au plan de la fi-

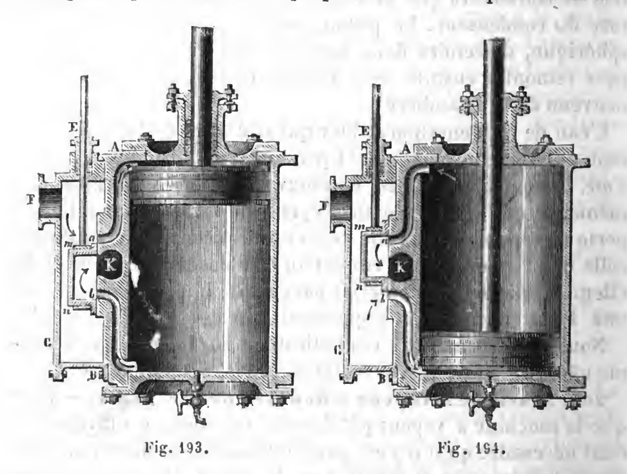


Fig. 193. Fig. 194.

gure dont la base est en K. Dans la boîte à vapeur se trouve une pièce *mn* qui a la forme d'un tiroir de table, et de là lui vient son nom de tiroir. Elle porte une tige E qui est mue par la machine elle-même et qui peut lui communiquer un mouvement de va-et-vient vertical, c'est-à-dire que tantôt elle monte et tantôt elle descend. Le mouvement du tiroir a pour effet de produire la distribution de la vapeur, c'est-à-dire de faire arriver la vapeur de la chaudière tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston. La figure 193 représente le tiroir au moment où, dégageant l'ouverture *a*, il permet à la vapeur de la boîte à vapeur d'entrer dans la partie supérieure du corps de pompe, de presser sur la face supérieure du piston et de le faire descendre. En ce moment l'intérieur du tiroir est en communication par l'ouverture *b* avec la partie inférieure du corps de pompe : la vapeur située au-dessous du piston se rend alors dans le tiroir et de là dans l'atmosphère par le conduit K. — La figure 194 représente la position inverse. Le tiroir a dégagé l'ouverture *b* ;

la vapeur entrant au-dessous du piston le fait remonter pendant que celle qui se trouve au dessus s'échappe dans l'atmosphère par le canal K, qui est maintenant en communication par l'ouverture *a* avec la partie supérieure du corps de pompe. Le piston remonte sous l'effet d'excès de pression que supporte la face inférieure.

266. — Ceci posé, nous allons décrire l'ensemble de la machine de Watt qui est représenté par la figure 195; la figure 196

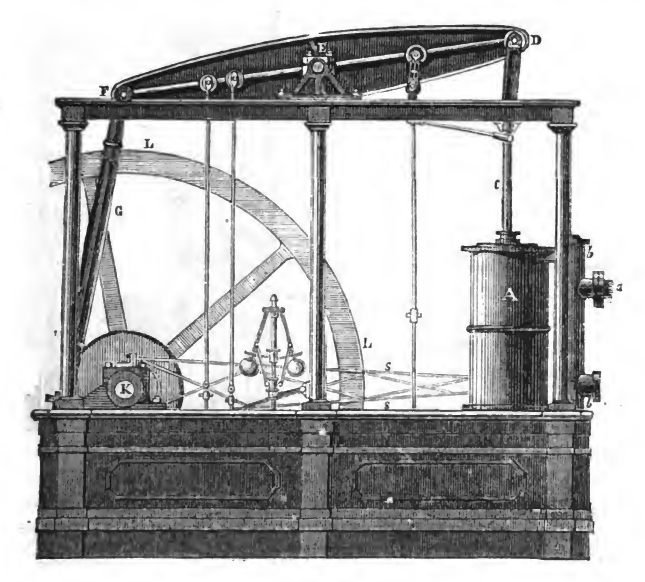



Fig. 195.

en représente la coupe et en fera mieux comprendre les détails.

Le cylindre est en A (fig. 196) : c'est à son intérieur que se meut le piston dont la tige est reliée au balancier DF par un parallélogramme articulé de Watt, qui permet au mouvement vertical de celle ci de se transformer, sans qu'elle s'infléchisse, en un mouvement de va-et-vient circulaire du balancier. Ce dernier oscille autour de son axe E, et, par l'intermédiaire d'une

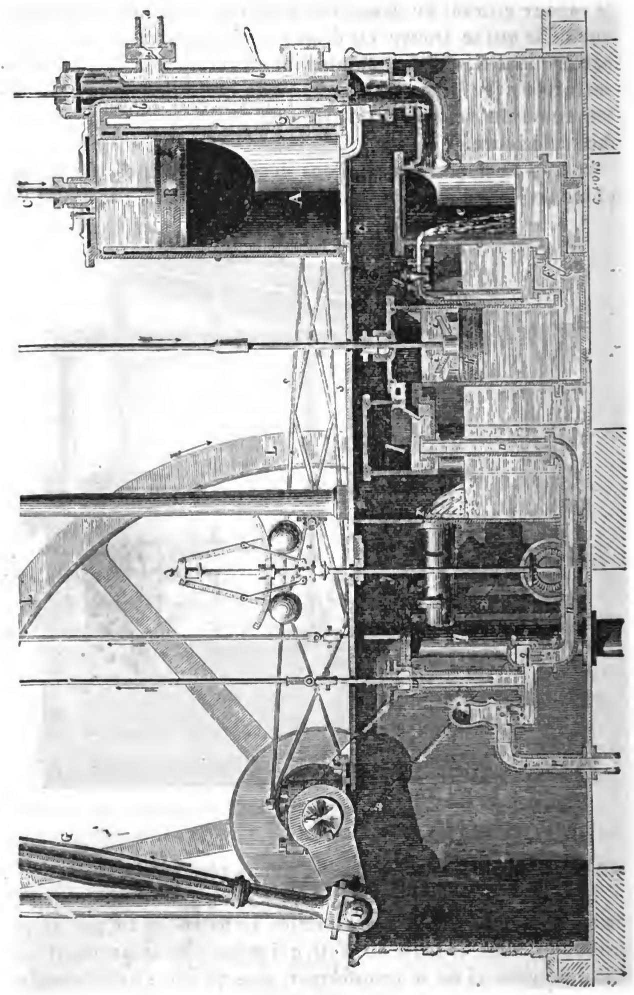


Fig. 196.

bielle G, fait mouvoir une manivelle mettant en mouvement l'arbre de rotation K qui commande tous les appareils que la machine doit faire mouvoir. Une grande roue L, adaptée à l'arbre K, appelée *volant*, sert à régulariser le mouvement de la machine en répartissant sur une plus grande masse les irrégularités d'action.

La figure 196 représente la machine au moment où, le piston descendant, la partie supérieure du cylindre est en communication avec la boîte *bb*, dans laquelle arrive la vapeur par le tuyau latéral *a*; la partie inférieure du cylindre communique par le tuyau *d* avec le condenseur *c*, où arrive un jet d'eau froide. Le piston *h* de la pompe à air, qui est relié au balancier par une tige, aspire par la soupape *k* l'eau échauffée du condenseur, et la refoule par les soupapes *i i* dans une bâche *l*. De cette bâche l'eau est aspirée par la pompe alimentaire *m* mue aussi par la machine : elle traverse le conduit D*n*, soulève la soupape *o*, puis est refoulée, en soulevant la soupape *o'*, dans un tuyau *p* qui la conduit à la chaudière. On voit qu'on utilise par cette disposition une partie de la chaleur latente abandonnée par la vapeur au moment de sa condensation, puisque c'est l'eau échauffée du condenseur qui sert à alimenter la chaudière.

Enfin une pompe *q*, mue encore par la machine, sert à puiser dans un puits ou dans un réservoir d'eau froide l'eau qu'elle refoule ensuite dans le condenseur.

267. **Excentrique.** — Nous avons admis jusqu'ici que le tiroir recevait un mouvement de va-et-vient nécessaire à la distribution de la vapeur. Voyons maintenant comment ce mouvement lui est communiqué.

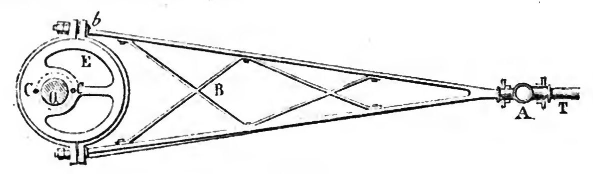



Fig. 197.

L'arbre O de la machine (fig. 197) porte un disque circulaire E qui fait corps avec lui, mais qui a son centre C en dehors de l'axe O. C'est ce qui fait donner à cette pièce le nom d'*excen-*

*trique*. Le disque E est entouré par un collier dans lequel il peut tourner en glissant, et qui est relié par un système de tringles convergentes à un levier coudé *abc* (fig. 198). L'axe O en tournant entraîne avec lui le disque E dans sa rotation, et porte son centre C (fig. 197) tantôt à sa droite, tantôt à sa gauche; il s'ensuit que

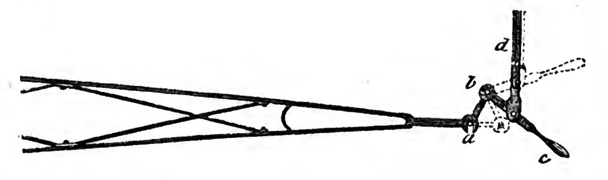



Fig. 198.

le collier qui entoure le disque E, tout en permettant à ce dernier de glisser dans son intérieur, se trouve reporté tantôt à droite, tantôt à gauche et par suite fait prendre au levier coudé *abc* tantôt la position marquée en lignes pleines sur la figure 198, tantôt celle qui est marquée en lignes ponctuées. La première position correspond au cas où le centre C du disque E se trouve à gauche de O, le second correspond au cas où C se trouve à droite. Mais d'autre part en un point du bras *bc* se trouve articulée une tige *d* dont l'autre extrémité s'articule elle-même avec la tige du tiroir. Il en résulte que le tiroir s'élève lorsque le mouvement de rotation de la machine fait passer le levier *abc* de la première à la seconde position, qu'il s'abaisse au contraire lorsque le levier revient de la seconde à la première position.

268. **Régulateur à force centrifuge.** — Le volant dont nous avons parlé ne suffit pas pour régulariser le mouvement de la machine, et il est cependant de la plus haute importance que ce mouvement soit aussi régulier que possible, malgré les variations dans les résistances à vaincre. Pour y arriver, il suffit d'avoir des appareils qui, lorsque la vitesse de la machine varie, fassent varier aussi la force motrice en fermant plus ou moins les valves qui donnent entrée à la vapeur. Il existe bien des appareils de ce genre; nous ne citerons que le régulateur à force centrifuge, qui est peut-être le plus employé.

Supposons une tige AB (fig. 199) capable de recevoir un mouvement de rotation autour de son axe et à laquelle se trouvent

articulées des tiges MM, portant des sphères métalliques à leurs extrémités. Supposons de plus que d'autres tiges NN soient articulées d'une part avec les tiges MM, d'autre part avec une bague DC capable de glisser le long de la tige verticale. Si l'on éloigne à la main les boules, de manière que l'angle en B du

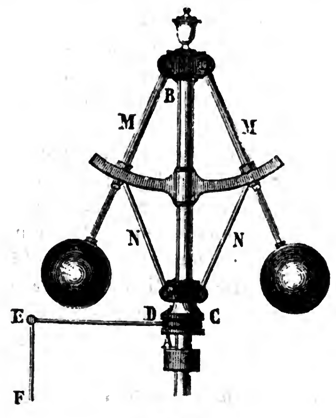



Fig. 199.

parallélogramme MMNN augmente, on voit que la bague remontera; si on les rapproche, elle descendra. Or, si l'arbre B est mis en mouvement de rotation, il se développe dans les boules une force appelée en mécanique *force centrifuge*, et qui tend à les écarter d'autant plus de l'axe que le mouvement est plus rapide. Cette force fera donc ce qu'on faisait tout à l'heure à la main. On conçoit alors que si l'arbre est mis en mouvement par la machine elle-même, cet arbre tournera d'autant plus vite que la vitesse de la machine sera plus grande; par suite, la bague DC se soulèvera d'autant plus, et comme elle est reliée par un levier DEF, à la valve d'admission de la vapeur, elle pourra fermer cette valve en partie. Si, au contraire, la vitesse de la machine vient à décroître, les boules retombent, la bague DC s'abaisse, la tige ouvre la valve et laisse arriver la vapeur en plus grande quantité.

269. **Détente de la vapeur.** — La machine à vapeur a reçu

depuis Watt un perfectionnement important au point de vue économique. Au lieu de laisser entrer la vapeur dans le cylindre pendant toute la course du piston, on a imaginé de ne la laisser entrer que pendant une partie de cette course, la moitié, le quart ou moins encore. Lorsque la communication avec la chaudière est interrompue, la vapeur, en se détendant, fait achever au piston sa course : il est vrai que la force va sans cesse en décroissant, mais le calcul et l'expérience montrent qu'il y a cependant grand avantage à employer ce système. Nous ne décrirons pas les dispositions variées qu'on donne au tiroir pour produire la détente.

270. **Machine sans condenseur.** — L'emploi d'un condenseur n'est indispensable qu'autant que l'on ne donne pas à la vapeur dans la chaudière une force élastique supérieure à une atmosphère. Mais lorsque la vapeur agit avec une pression notablement plus forte, il devient inutile : il suffit alors de mettre alternativement en communication avec l'air extérieur chacune des parties du cylindre ; la vapeur s'échappe au dehors et le piston se meut sous l'influence des différences de pression qu'il supporte sur ses deux faces.

271. **Classification des machines à vapeur.** — Les machines à vapeur se divisent, au point de vue de la pression qu'elles emploient, en trois catégories :

1° Les machines à *basse pression*, dans lesquelles la force élastique de la vapeur ne dépasse guère la pression atmosphérique ;

2° Les machines à *moyenne pression* qui marchent sous une pression ne dépassant pas quatre atmosphères ;

3° Enfin les machines à *haute pression*, dans lesquelles la pression est supérieure à quatre atmosphères.

On distingue aussi :

1° Les machines *sans détente et sans condenseur* ;

2° Les machines *sans détente et à condenseur* ;

3° Les machines *à détente et sans condenseur* ;

4° Les machines *à détente et à condenseur*.

272. **Chaudières à vapeur.** — La production de la vapeur s'effectue dans des appareils appelés *chaudières*, qui ont en général la forme d'un cylindre allongé. Depuis Watt, Woolf a no-

tablement perfectionné la forme des chaudières par l'emploi des bouilleurs.

La chaudière A (fig. 200 et 201 qui représentent, la première, une coupe longitudinale, la seconde, une coupe transversale)

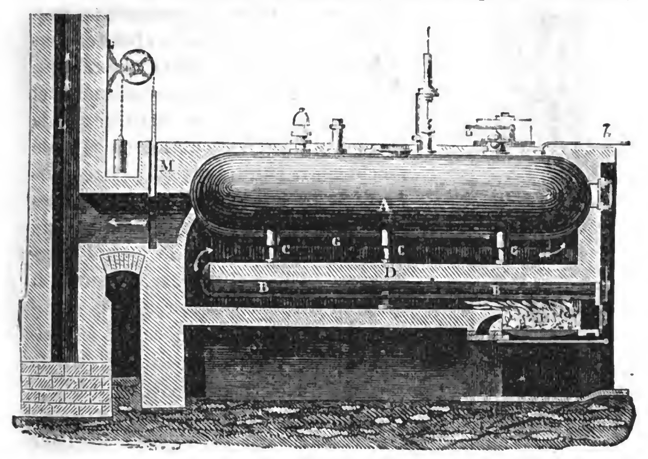



Fig. 200.

communique par les tubulures C, C avec deux cylindres B, B, nommés *bouilleurs*, situés au-dessous d'elle et ayant à peu près la même longueur qu'elle, mais un diamètre plus petit. Le fourneau est construit de manière que la flamme soit forcée de venir successivement lécher les différentes parties de la surface de chauffe. Pour cela, une cloison horizontale D en maçonnerie, établie à la hauteur des bouilleurs, sépare le fourneau en deux étages : l'étage supérieur est lui-même divisé par deux cloisons verticales en trois parties H, G, H ; les parties H, H sont appelées les *carneaux*. La flamme, en sortant du foyer E, se rend dans le conduit F, où elle échauffe les bouilleurs, passe ensuite dans l'étage supérieur, où elle traverse le conduit G en léchant la partie inférieure de la chaudière, et de là dans les carneaux H, H, en suivant les parties latérales de la chaudière. En sortant des carneaux, les produits de la combustion passent dans la cheminée L. Le tirage est réglé par un registre M.

Les dispositions des chaudières, des fourneaux, la conduite du feu par le chauffeur, sont d'une importance capitale, au double point de vue de la quantité de vapeur produite et de la quantité de combustible employé. Les industriels ne sauraient apporter une trop grande attention dans le choix et dans la surveillance de leurs chauffeurs; c'est dans l'intention de stimuler et d'éclairer les efforts de ceux-ci que la Société industrielle d'Amiens a fondé un concours annuel pour les chauffeurs du département de la Somme. Tous les concurrents chauffent, pendant un même temps et avec le même charbon, une même chaudière, et ceux qui arrivent aux meilleurs résultats reçoivent des récompenses. Il serait à désirer qu'une pareille institution se répandît dans toutes nos villes manufacturières.

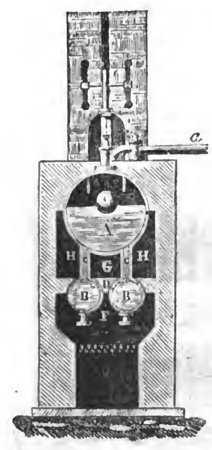



Fig. 201.

273. **Soupape de sûreté.** — Pour permettre à la vapeur de sortir, quand elle acquiert un excès de pression dans la chaudière, des soupapes de sûreté sont installées sur celle-ci. La figure 202

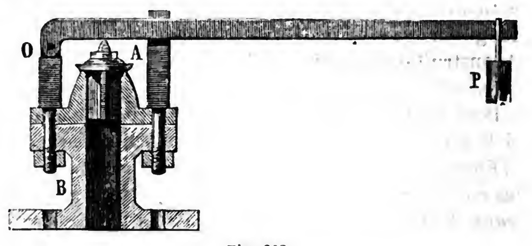



Fig. 202.

en représente la disposition. Sur la tête de la soupape A s'appuie un levier mobile autour de O, et à l'extrémité B duquel se trouve un poids P, dont la valeur et la distance au point C sont réglées de manière que la soupape se soulève, lorsque la

vapeur a atteint la pression qu'elle ne doit pas dépasser relativement à la résistance de la chaudière.

Il est important, pour la conduite du feu, que le chauffeur connaisse à chaque instant la force élastique de la vapeur. Un manomètre installé sur la chaudière le renseigne à cet égard.

274. **Flotteur. Sifflet d'alarme.** — On doit éviter de laisser le niveau de l'eau baisser par trop dans la chaudière. Parmi les systèmes employés pour avertir le chauffeur, nous citerons le suivant. Une boule A (fig. 203), servant de flotteur et reliée par

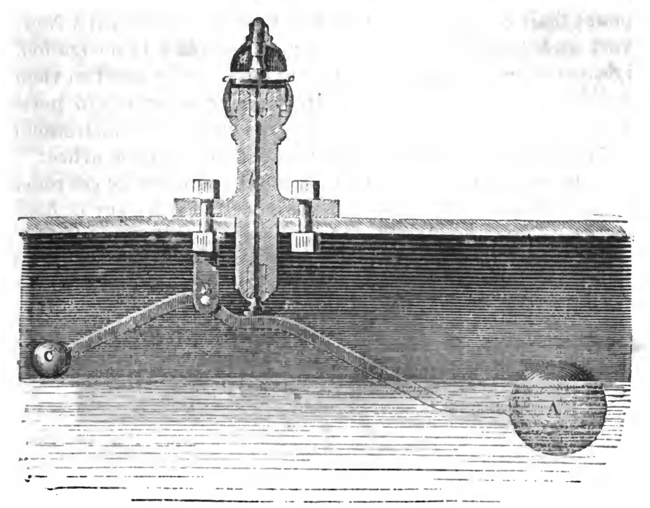



Fig. 203.

une tige à un point de rotation B, flotte à la surface de l'eau. Elle est équlibrée par un contre-poids C. Ce flotteur suit l'eau dans ses variations de niveau. La tige du flotteur, tant que le niveau est suffisamment élevé, pousse un bouchon conique *a* contre un conduit *b* qui correspond avec l'extérieur. Dès que le niveau baisse trop, le bouchon *a* s'abaisse, la vapeur sort et, en s'échappant par l'ouverture annulaire *cc*, rencontre le timbre *d* par sa tranche et produit un sifflement aigu qui avertit le chauffeur.

275. **Chaudières tubulaires.** — On emploie beaucoup aussi

maintenant, même pour les machines fixes, les chaudières tubulaires. Ces chaudières, qui donnent d'excellents résultats, sont telles que les produits de la combustion, avant de se rendre dans la cheminée, parcourent une série de tubes en cuivre qui sont immergés dans l'eau de la chaudière. On comprend que la surface de chauffe se trouve ainsi très augmentée. Ce système est exclusivement employé dans les locomotives.

276. **Bateaux à vapeur.** — C'est en 1695 que Papin émit l'idée de faire mouvoir les bateaux au moyen de machines à vapeur; mais ce n'est qu'en 1807 que Fulton[1] construisit à New-York un bateau qu'on put employer avec succès à la navigation. Les machines employées ne diffèrent pas de celles que l'on vient de décrire; on les emploie à faire tourner un arbre qui porte deux roues à palettes ou une hélice. On emploie ordinairement des machines à double effet qui agissent sur le même arbre.

La figure 204 représente un bateau à roues. L'une de ces roues est disposée sur le flanc droit du bateau, l'autre sur le flanc

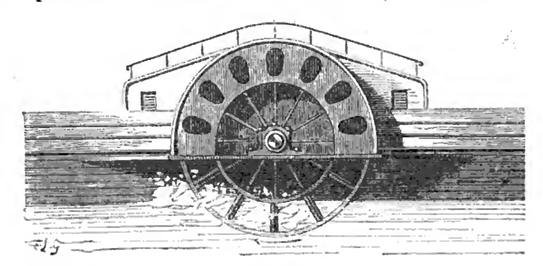


Fig. 204.

gauche. Leurs aubes viennent tour à tour choquer l'eau et prennent ainsi un appui sur le liquide pour pousser le bateau en avant.

L'idée d'employer l'hélice comme agent propulseur appartient à deux Français, Du Quet et Panneton (1727). Ce fut l'ingénieur suédois Ericson qui le premier obtint des résultats satisfaisants (1836).

La forme des hélices est assez variable : elles se composent

[1] Fulton, célèbre mécanicien, né en 1767 aux États-Unis, à Little-Brittain, en Pensylvanie, mort en 1815.

cependant toujours d'un axe horizontal parallèle à la quille du bâtiment, mis en mouvement par la vapeur et portant vers son extrémité libre, en dehors du bateau, des ailes inclinées à la manière des ailes d'un moulin (fig. 205). Lorsque l'axe tourne, les ailes tournent en même temps, s'appuient sur l'eau et poussent le bateau en avant.

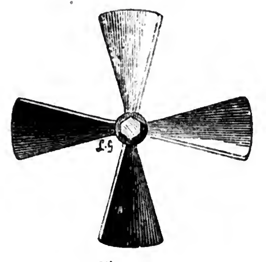


Fig. 205.

L'hélice en tournant dans l'eau se comporte à peu près comme un tire-bouchon, qui ne progresse dans le liége que parce que la spirale qui le forme trouve appui dans la masse de liége.

Sauvage a proposé de substituer à l'hélice ordinaire une hélice formée de deux segments hélicoïdaux, formant chacun une demi-révolution autour de l'axe et inclinés d'un angle moyen de 45° environ. MM. Smith et Rennie ont appliqué le système Sauvage au navire *l'Archimède* (fig. 206).

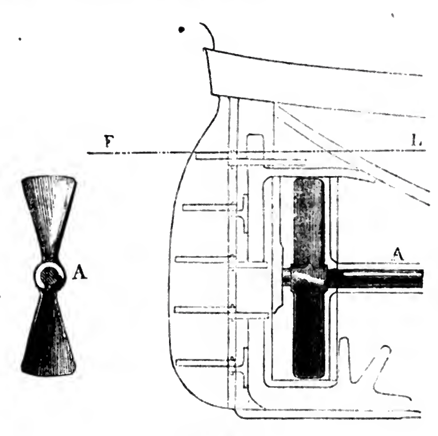



Fig. 206.

Sur le *Napoléon*, avec lequel on a obtenu la vitesse de 18k, 56 à l'heure sans se servir de voiles et de 25 kilomètres en se ser-

vant en même temps des voiles, l'hélice (fig. 207) est formée de trois ailes inclinées sur l'axe et formant chacune moins d'un quart de révolution.

277. **Locomotives.** — On appelle locomotives les machines à vapeur qui entraînent à leur suite sur les rails des chemins

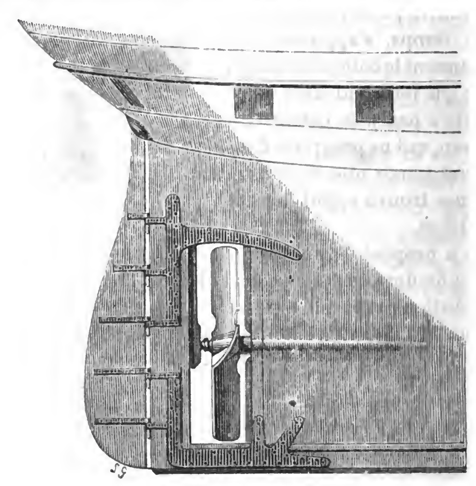


Fig. 207.

fer une file de voitures appelées *wagons*. Les locomotives sont des machines à haute pression. La chaudière B (fig. 208) forme la majeure partie de la machine ; elle est tubulaire. Une déchirure faite sur la figure dans le corps de la chaudière laisse voir les tubes qui conduisent les produits de la combustion dans la cheminée. De chaque côté de la machine, un cylindre A contient un piston mû par la vapeur ; un tiroir met les deux parties du cylindre alternativement en communication avec la cheminée par laquelle s'échappe la vapeur. La tige du piston transmet son mouvement par une bielle, ou tout autre système, aux roues de la machine. La manivelle que le mécanicien tient à la main sert à régler l'entrée de la vapeur proportionnellement à la vitesse qu'il veut obtenir. Les deux tubes placés, au bas de la machine, au-dessous du foyer, amènent du *tender*, ou voiture située derrière la

locomotive, l'eau que des pompes mises en mouvement par la machine injecteu danst la chaudière.

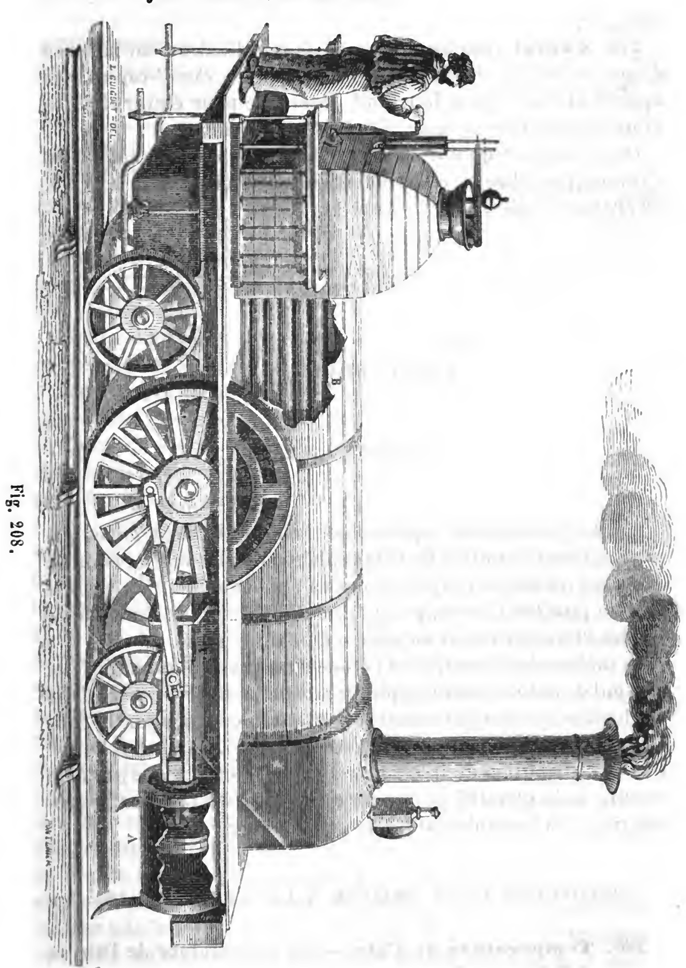


Fig. 208.

Ces pompes sont souvent remplacées maintenant avec avantage

par un appareil spécial que nous ne décrirons pas et qui est connu sous le nom d'*injecteur*. Cet appareil a été inventé par M. Giffard.

278. **Cheval-vapeur.** — On évalue ordinairement la force d'une machine à l'aide d'une unité appelée *cheval-vapeur*. On appelle cheval vapeur le travail nécessaire pour élever 75 kilogrammes, en une seconde, à un mètre de hauteur.

On dit souvent qu'une machine est de la force de 10, 20, 30 chevaux, pour dire qu'elle produit un travail équivalent à 10, 20, 30 chevaux-vapeur.

---

# CHAPITRE VIII

## MÉTÉOROLOGIE.

279. La météorologie a pour objet l'étude des phénomènes qui se produisent au milieu de l'atmosphère ; elle les analyse pour en chercher les lois et l'explication. Ces phénomènes nous intéressent au plus haut degré, puisqu'ils ont une influence immédiate sur les êtres qui vivent au milieu de l'atmosphère.

La météorologie comprend l'étude d'un grand nombre de faits souvent de nature assez complexe ; nous ne nous occuperons dans ce chapitre que des phénomènes pouvant s'expliquer par les connaissances que nous avons acquises jusqu'ici. Ils sont relatifs : 1° à la distribution de la chaleur à la surface du globe ; 2° à la mesure de la quantité de vapeur contenue dans l'air, ou hygrométrie ; 3° à la condensation de cette vapeur.

### DISTRIBUTION DE LA CHALEUR A LA SURFACE DU SOL.

280. **Température de l'air.** — La température de l'air se mesure à l'aide des thermomètres que nous avons décrits plus

haut. L'instrument doit être placé à environ 2 mètres au-dessus du sol, à l'ombre et exposé au nord.

Les thermomètres à maxima et minima peuvent rendre de grands services dans l'appréciation de la température de l'air. Quand on veut obtenir la température moyenne d'un jour, on peut opérer de plusieurs manières ; ou bien prendre la moyenne des températures maxima et minima, indiquées par les thermomètres de Ruterford (fig. 157, et 158) ou par le thermométrographe de Six et Bellani (fig. 159), ou bien observer le thermomètre à 4 heures et 10 heures du matin, à 4 heures et 10 heures du soir, et prendre la moyenne des quatre observations. On a remarqué que ces deux méthodes donnaient assez exactement la température moyenne de l'air, pour qu'on ne soit pas obligé de multiplier davantage les observations.

Si l'on divise par le nombre des jours d'un mois la somme des moyennes des jours de ce mois, on a la *moyenne mensuelle*.

En divisant par 12 la somme des moyennes mensuelles, on a la *moyenne annuelle*.

Enfin, on désigne, sous le nom de *température moyenne d'un lieu*, la moyenne des moyennes annuelles de ce lieu pendant un grand nombre d'années.

281. **Variations de la température d'un lieu pendant un même jour.** — En un même lieu, la température n'est pas la même pendant tout le jour. Personne n'ignore qu'en général la température est plus élevée vers le milieu du jour qu'au matin et au soir. Les observations des physiciens ont prouvé que la température la plus basse se produisait en un lieu déterminé un peu après le lever du soleil, et la température la plus élevée vers deux heures de l'après-midi. Ces résultats sont faciles à expliquer. La chaleur que nous recevons nous vient du soleil ; et, à mesure que cet astre monte au-dessus de l'horizon, ses rayons tombent sur nous moins obliquement. Or, lorsqu'un rayon calorifique tombe sur une surface, il l'échauffe d'autant plus qu'il est moins oblique par rapport à elle. C'est à midi que le soleil nous envoie les rayons les moins obliques, et ce n'est cependant pas à cette heure qu'a lieu le maximum ; cela tient à ce que la quantité de chaleur que la terre rayonne de midi à deux heures est moindre que celle qu'elle reçoit ; l'élévation de température doit donc continuer ; ce n'est qu'après deux heures que la chaleur reçue

est inférieure à la chaleur rayonnée, aussi n'est-ce qu'à partir de cette heure que la température décroît. Le minimum n'a lieu qu'un peu après le lever du soleil, parce que dans les instants qui suivent ce lever, la terre continue à perdre de la chaleur, sans que cette perte soit entièrement compensée par les rayons solaires.

282. **Saisons météorologiques.** — On sait que la température moyenne d'un jour n'est pas la même aux différentes époques de l'année. Cette variation est due à l'inégalité des jours et des nuits : quand les jours sont plus longs, la terre s'échauffe davantage, parce qu'elle reçoit pendant un temps plus long les rayons du soleil. Or, la durée maximum du jour a lieu au 21 juin, et la durée minimum au 21 décembre. Cependant on a observé que le minimum de température n'avait lieu que dans les premiers jours de janvier et le maximum dans les premiers jours de juillet. Cela s'explique par des raisons analogues à celles que nous avons exposées pour le maximum et le minimum d'un même jour. Après le 21 juin, la terre continue à s'échauffer, parce qu'elle rayonne moins de chaleur qu'elle n'en reçoit, et de même, après le 21 décembre, elle en rayonne plus que le soleil ne lui en envoie. Aussi, en météorologie, considère-t-on le mois le plus chaud, c'est à-dire le mois de juillet, comme le milieu de l'été qui comprendra juin, juillet, août ; le mois le plus froid, c'est-à-dire janvier, comme le milieu de l'hiver qui comprendra décembre, janvier et février : mars, avril et mai formeront le printemps ; septembre, octobre et novembre formeront l'automne.

283. **Causes et variations de la température en différents lieux.** — La température moyenne varie d'un lieu à l'autre. Cette variation dépend de plusieurs causes qui sont :

1° La *latitude*. A mesure que la latitude augmente, la température moyenne diminue. C'est pour exprimer ce fait qu'on a divisé le globe en cinq zones. Ce sont : 1° la *zone torride* comprise entre les tropiques, c'est-à-dire entre deux parallèles à l'équateur qui sont situés à 23° 28′. A l'équateur les jours étant toujours égaux aux nuits, la température est uniforme et très-élevée ; 2° les *zones tempérées* comprises entre chaque tropique et le cercle de 66° 32′ de latitude ; 3° les *zones glaciales*, comprises entre le 66° de latitude et le pôle.

2° *L'altitude du lieu.* Plus l'altitude d'un lieu, c'est-à-dire l'é-

lévation au-dessus du niveau de la mer, est grande, plus sa température moyenne est basse. Tout le monde sait qu'il fait plus froid sur le sommet des montagnes qu'à leur pied.

3° *La direction moyenne des vents*. Quand les vents soufflent ordinairement de contrées septentrionales, la température est plus basse; l'inverse a lieu quand ils soufflent des contrées méridionales.

4° *Le voisinage des côtes*. Dans le voisinage des côtes. le climat est ordinairement plus tempéré, les variations de température sont moins grandes, parce que les eaux qui baignent les côtes s'échauffent et se refroidissent plus lentement que la terre.

## VENTS.

284. Lorsque la densité de l'air est partout la même, l'atmosphère reste en repos; mais dès que cet équilibre est rompu par une cause quelconque, il en résulte un mouvement que l'on appelle *vent*. Supposons qu'une région du globe soit fortement échauffée : les couches d'air voisines du sol deviennent moins denses et s'élèvent; elles doivent donc être remplacées par de l'air froid venant des régions voisines, de là un vent soufflant de la région froide vers la région chaude; il est évident que ce vent se propage autour de la région considérée en sens inverse de sa direction. Lorsque les couches d'air échauffées se sont élevées à une certaine hauteur, elles se déversent de part et d'autre et il en résulte, dans les régions supérieures de l'atmosphère, un vent de direction contraire à celle du vent soufflant dans les régions inférieures.

L'expérience suivante nous rendra compte de la production des vents.

En hiver, ouvrons la porte qui fait communiquer un appartement chauffé avec un autre qui ne l'est pas. Nous sentirons immédiatement un courant d'air, et, si nous plaçons une bougie allumée tantôt à la partie inférieure de l'ouverture, tantôt à sa partie supérieure, nous constaterons, par la direction de la flamme, l'existence d'un double courant d'air, qui, en bas, est dirigé de l'appartement froid vers l'appartement chauffé, en haut dans un sens inverse.

La condensation d'une certaine quantité de vapeur d'eau at-

mosphérique dans un lieu déterminé produit un vide, qui est bientôt rempli par les couches d'air voisines; c'est là une nouvelle cause des vents.

285. **Vents périodiques. Brises de terre et de mer. Moussons. Alizés.** — Sur les côtes, lorsque le temps est calme, on ne sent aucun mouvement dans l'air jusqu'à huit ou neuf heures du matin; mais alors il s'élève peu à peu une brise venant de la mer : c'est *la brise de mer*. En effet, la terre s'échauffant plus vite que les eaux de la mer sous l'influence du soleil levant, l'air qui se trouve au-dessus d'elle s'échauffe aussi plus vite que celui qui est en contact avec la mer, et le courant aérien inférieur doit s'établir de la mer vers la terre. Le soir, le phénomène inverse a lieu, parce que le refroidissement de la terre est plus rapide que celui des eaux de la mer : alors souffle *la brise de terre*.

On appelle *moussons* les vents périodiques qui règnent pendant six mois dans un sens et, pendant six autres mois, en sens contraire. On les observe spécialement dans l'océan Indien.

On appelle *vents alizés* des vents qui soufflent du nord-est dans notre hémisphère et du sud-ouest dans l'hémisphère austral. Ils sont dus à l'influence combinée de la rotation de la terre et de l'échauffement des couches d'air situées à l'équateur. Nous n'exposerons pas la théorie qui explique leur formation.

286. **Vitesse des vents.** — La vitesse des vents est très-variable. Les marins appellent *vent frais* celui qui parcourt environ 10 mètres par seconde, *grand frais* le vent de 15 mètres, *très-grand frais* celui de 20 mètres. Quand la vitesse atteint 25 ou 30 mètres, on a ce que l'on nomme une *tempête;* si elle s'élève à 35 ou 45 mètres par seconde, il en résulte un *ouragan*.

## HYGROMÉTRIE.

287. **But de l'hygrométrie.** — L'atmosphère renferme toujours de la vapeur aqueuse. Il suffit, pour s'en convaincre, d'abandonner à l'air, dans un vase découvert, de l'acide sulfurique, de la potasse caustique, ou toute autre substance avide d'eau; au bout de peu de temps, l'augmentation de poids subie par ces corps prouve qu'ils ont absorbé une certaine quantité d'eau. On

sait aussi qu'un vase plein de glace exposé à l'air se recouvre bientôt d'une couche de rosée qui n'est autre que la vapeur condensée. Cette condensation a lieu, parce que les couches d'air qui enveloppent le vase se refroidissent et arrivent bientôt à une température pour laquelle elles sont saturées de vapeur. A partir de cette limite, le refroidissement continuant, la vapeur se condense.

La vapeur d'eau qui se trouve dans l'air a pour source principale l'évaporation spontanée des masses d'eau qui se trouvent à la surface de la terre. Une nappe d'eau, dans des conditions ordinaires de température, laisse évaporer, en vingt-quatre heures, un litre d'eau environ par mètre carré de surface ; chaque kilomètre carré de la mer fournit donc environ, pendant vingt-quatre heures, 1000000 de litres d'eau, ce qui correspond à peu près pour toute la surface des mers à 400000000 de fois 1000000 de litres d'eau. Si l'on ajoute à cela la vapeur fournie par les nappes d'eau douce, fleuves, lacs, etc., on se rendra compte de l'énorme quantité de vapeur que reçoit constamment l'atmosphère, et on remarquera que l'équilibre ne peut subsister qu'à la condition que l'atmosphère rende à la terre l'eau qu'elle en reçoit; c'est ce qu'elle fait, comme nous le verrons plus tard, par la pluie, la neige, la grêle, la rosée, etc.

La quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère est très-variable ; et comme elle a une influence considérable sur un grand nombre de phénomènes, il était intéressant de rechercher des moyens propres à la déterminer. L'hygrométrie est la partie de la physique qui traite de cette détermination, et les hygromètres sont les appareils à l'aide desquels on l'exécute.

On appelle *état hygrométrique* de l'air le rapport qui existe entre la quantité de vapeur que contient un volume déterminé de cet air et celle qu'il contiendrait, s'il était saturé à la même température.

Il y a plusieurs sortes d'hygromètres. Nous ne décrirons que l'hygromètre à cheveu de Saussure.

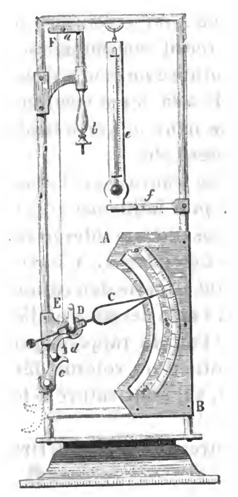
288. **Hygromètre de Saussure.** — La plupart des corps plongés dans l'air humide absorbent une quantité de vapeur aqueuse, qui varie avec leur affinité pour l'eau et avec l'état hygrométrique de l'air. Ils rendent à l'air une partie de cette eau, lorsque l'état hygrométrique diminue : il arrive souvent en

même temps que leurs dimensions changent : le bois, par exemple, se gonfle à l'humidité et se contracte en se desséchant. Le cheveu est une des substances les plus sensibles à l'influence de la vapeur d'eau ; il s'allonge, dès qu'il se trouve dans l'air humide, et se contracte lorsque l'air se dessèche.

Saussure a profité de cette propriété dans la construction de son hygromètre.

On prend un cheveu fin et doux, coupé sur une tête saine et vivante, et on le débarrasse de la matière grasse qui le recouvre en le lavant dans une dissolution de carbonate de soude. On peut aussi employer l'éther à cet effet. Ainsi préparé, un cheveu se dilate de 0,0245 de sa longueur totale en passant de la sécheresse absolue à l'humidité extrême.

Le cheveu est ensuite fixé par son extrémité supérieure F (fig. 209 et 210) dans une pince *a* qu'une vis de pression assujettit



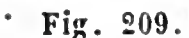



Fig. 209.

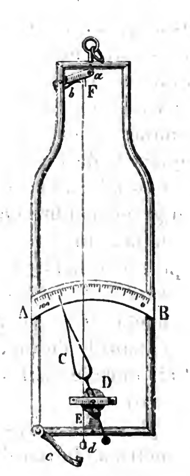



Fig. 210.

vers le haut d'un cadre de laiton. Une poulie à deux gorges D reçoit sur l'une d'elles l'extrémité inférieure E du cheveu qui lui est solidement fixée ; l'autre gorge reçoit un fil suspendant

un contre poids destiné à maintenir le cheveu constamment tendu. Dès que l'humidité fait changer les dimensions de ce dernier, la poulie se trouve entraînée dans un sens ou dans l'autre, et son mouvement est accusé par une aiguille C qui y est fixée et qui peut se mouvoir sur un cadre AB. La pièce *c* des fig. 209 et 210 est une fourchette mobile susceptible d'être fixée par une vis de pression. Quand l'instrument n'est pas en observation, on la relève, elle soutient le poids *d* et le cheveu ne se fatigue pas inutilement.

Pour graduer l'hygromètre, il faut d'abord déterminer deux points fixes : le point d'extrême humidité et celui de sécheresse absolue. Pour le premier, on supend l'hygromètre au milieu d'un vase dont les parois intérieures ont été mouillées avec de l'eau et qui repose lui-même sur une assiette pleine d'eau ; dans ces conditions l'atmosphère du vase peut être considérée comme saturée, et la vapeur d'eau qu'elle contient agissant sur le cheveu en produit la dilatation. Au bout de deux heures environ, le cheveu cesse de s'allonger et on marque 100° au point où l'aiguille s'est arrêtée. Le second point fixe se détermine avec le même appareil, où l'on remplace l'eau par l'acide sulfurique concentré qui dessèche l'atmosphère du vase. L'aiguille rétrograde par suite de la contraction du cheveu, et, au bout d'un certain temps, celui-ci ayant atteint son maximum de contraction, elle s'arrête. On marque *o* en face de cette nouvelle position et l'intervalle entre *o* et 100 est divisé en cent parties égales, qui forment les degrés de l'hygromètre.

Ainsi gradué, l'instrument ne peut servir qu'à indiquer approximativement le degré d'humidité de l'air. Ses indications n'étant pas proportionnelles à la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, il faut, pour qu'il puisse servir à déterminer exactement l'état hygrométrique, avoir des tables que l'on peut construire d'après les méthodes de MM. Gay-Lussac et Regnault.

Nous remarquerons de plus qu'il faut construire une table spéciale pour chaque hygromètre.

289. On a construit d'autres hygromètres reposant sur les mêmes principes. Le cheveu est remplacé par une corde de même nature que celles qu'on emploie pour les instruments de musique. L'une de ses extrémités est attachée à un point

fixe, l'autre au petit bras d'un levier que la corde fait tourner dans un sens ou dans l'autre, selon qu'elle s'allonge ou se contracte. L'autre bras du levier a la forme tantôt d'un capuchon qui se relève sur la tête d'un capucin, lorsque l'air est humide, tantôt d'un parapluie qui s'ouvre, dans la même circonstance, sur la tête d'un petit personnage.

Ces instruments ne peuvent donner que des indications assez grossières.

290. **Résultats généraux des observations hygrométriques.** — A la surface de la terre, l'hygromètre marque rarement 100°, même lorsqu'il pleut ; jamais non plus il ne descend au-dessous de 40°. La moyenne annuelle de ses indications est d'environ 72°.

Dans son voyage aérostatique, Gay-Lussac a remarqué qu'à 7,000$^{m}$ d'élévation, à la température de 10° au-dessous de zéro ; l'hygromètre était descendu à 26°.

## CONDENSATION DE LA VAPEUR D'EAU ATMOSPHÉRIQUE. MÉTÉORES AQUEUX.

291. **Brouillards.** — Les brouillards sont des amas de vapeur d'eau condensée, dans le voisinage du sol, en gouttelettes excessivement fines qui rendent l'atmosphère plus ou moins opaque. La cause qui les produit est, en général, le refroidissement d'une masse d'air voisine de son point de saturation.

Les brouillards se forment surtout le matin dans le voisinage des mers, rivières, lacs, étangs, parce que les eaux, moins vite refroidies que l'atmosphère, donnent des vapeurs qui, arrivant au milieu de l'air, y subissent un abaissement de température suffisant pour les rendre saturantes. Le brouillard disparaît ordinairement après le lever du soleil, parce que les rayons élèvent la température de l'air et augmentent sa capacité pour la vapeur d'eau.

292. **Nuages.** — Les nuages ne sont autres que des brouillards parvenus dans les régions supérieures de l'atmosphère. Cette assimilation est de tous points justifiée par les observations que l'on peut faire dans les pays montagneux. Lorsqu'on s'élève sur les flancs des montagnes, il arrive qu'à certains moments on se trouve enveloppé de brouillards. Si l'on continue à gravir, on

peut atteindre des couches d'air parfaitement transparentes ; et, si l'on jette alors les yeux au-dessous de soi, on aperçoit les brouillards, que l'on vient de traverser, courir sous forme de nuages le long des flancs de la montagne.

Les physiciens ont beaucoup discuté pour connaître les causes de la suspension des nuages. Deluc admettait la formation de vésicules enfermant dans leur sein des gaz d'une densité moindre que l'air. Mais on a démontré que cette explication est erronée. Des observations plus précises ont prouvé que si un nuage paraît suspendu au milieu de l'atmosphère, il n'en est pas moins animé d'un mouvement descendant. C'est ce que l'on constate en se plaçant sur une montagne, à la hauteur même des nuages qui flottent au-dessus d'une plaine. Si, dans sa course descendante, le nuage rencontre une couche d'air plus chaude que celle au milieu de laquelle il a pris naissance, l'eau en partie condensée qu'il renferme repasse à l'état de vapeur invisible, et il se dissipe à sa partie inférieure, tandis qu'il se reforme à sa partie supérieure. Si l'on ajoute à cette circonstance qu'il peut aussi rencontrer des couches d'air animées d'un mouvement ascendant, on comprendra facilement pourquoi les nuages nous paraissent souvent suspendus à une hauteur constante. C'est pour cette raison qu'à midi, heure à laquelle le courant d'air ascendant est plus fort, les nuages sont plus élevés que dans la matinée. Vers le soir, au contraire, quand ce courant devient plus faible, ils s'abaissent et disparaissent souvent en arrivant dans les régions chaudes de l'atmosphère.

La hauteur des nuages est très-variable ; la région moyenne est comprise entre 500 et 1500 mètres ; mais il en est qui sont quelquefois à une hauteur de plus de 7000 mètres.

On appelle *cumulus* les gros et magnifiques nuages blancs à contours arrondis, qui s'entassent sur l'horizon pendant les chaleurs de l'été. Leur apparition présage l'orage. On les voit en B (fig. 211).

On nomme *cirrus* des nuages qui ont tantôt l'aspect de légers flocons, tantôt celui de filaments déliés et qui donnent au ciel l'aspect *pommelé*. On les voit en A. Dans nos contrées, ils apparaissent quand le vent du midi commence à souffler, après une période de beau temps. L'apparition des cirrus précède le plus souvent un changement de temps. En été ils annoncent la pluie : en

hiver, la gelée ou le dégel. Les cirrus sont les nuages les plus élevés.

Les *stratus*, que l'on a représentés en C, sont des nuages dispersés en bandes horizontales, qui se forment au coucher du soleil et disparaissent à son lever. Les stratus rouges du soir annoncent en général le beau temps.

Enfin on appelle *nimbus* des nuages qui, comme D, sont tellement confondus ensemble qu'il est impossible de les distinguer l'un de l'autre. Ils se résolvent ordinairement en pluie.

293. **Pluie.** — Quand la température d'un nuage s'abaisse, la condensation de la vapeur s'y produit et les vésicules se transforment en véritables gouttes d'eau qui tombent vers la terre et constituent la pluie. Lorsque dans leur chute ces gouttes d'eau rencontrent des couches parfaitement sèches, elles se vaporisent à leur surface, et la vaporisation peut être assez complète pour que la pluie n'arrive pas jusqu'au sol, ou n'y arrive qu'à l'état de pluie fine. Si, au contraire, les couches inférieures de l'atmosphère sont à peu près saturées, les gouttes d'eau qui les traversent se trouvant plus froides qu'elles condensent à leur surface une portion de la vapeur, et les gouttes de pluie grossissent à mesure qu'elles approchent du sol.

On appelle *udomètres* ou *pluviomètres* des appareils qui servent à mesurer la quantité de pluie qui tombe dans un lieu déterminé. Un udomètre est tout simplement un vase en fer-blanc ouvert à sa partie supérieure. Pour éviter que l'eau tombée dans le vase ne s'évapore, depuis l'instant où elle y arrive jusqu'à celui où l'on observera l'épaisseur de la couche qu'elle y forme, on recouvre l'udomètre avec un entonnoir. L'entonnoir reçoit la pluie, la laisse pénétrer dans le vase par un trou étroit et l'empêche, une fois entrée, de se dissiper en vapeur. C'est ainsi qu'on a reconnu, que, si l'eau ne s'infiltrait pas dans le sol, la pluie pourrait constituer au bout d'un an une couche épaisse, à Paris, de 60 cent., à Bordeaux, de 89 cent., à Rouen, de 99 cent., à Toulouse, de 64 cent., à Nantes, de 135 cent.

294. **Serein.** — En été, dans la vallée, il tombe quelquefois après le coucher du soleil, sans qu'il y ait de nuages au ciel, une petite pluie extrêmement fine, qu'on appelle *serein*. Cette pluie résulte du refroidissement que la disparition du soleil provoque dans l'air de la vallée et de la condensation partielle de la vapeur d'eau atmosphérique.

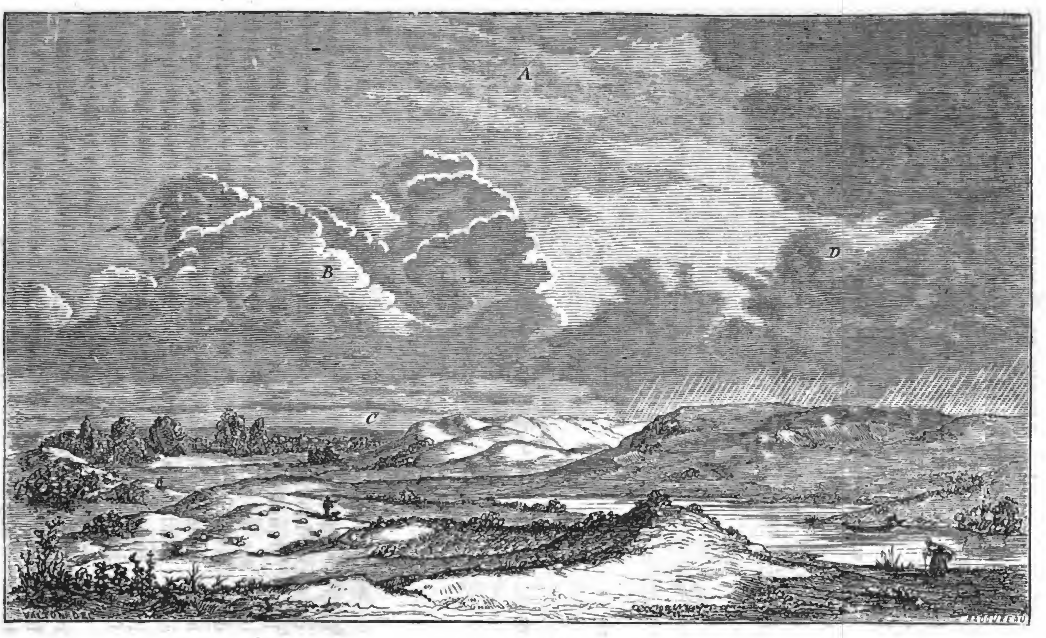



Fig. 211.

295. **Verglas.** — Pendant l'hiver, il arrive quelquefois qu'à de longues gelées succède brusquement un temps pluvieux. Si la pluie vient à toucher le sol, alors que la température de celui-ci est encore au-dessous de zéro, elle se gèle et forme sur la terre une couche mince de glace que l'on appelle *verglas*.

296. **Neige.** — La neige provient de la solidification de la vapeur d'eau dans les régions élevées de l'atmosphère; chaque flocon est formé par la réunion de petits cristaux, dont la figure 212 représente les formes variées. La neige n'arrive pas

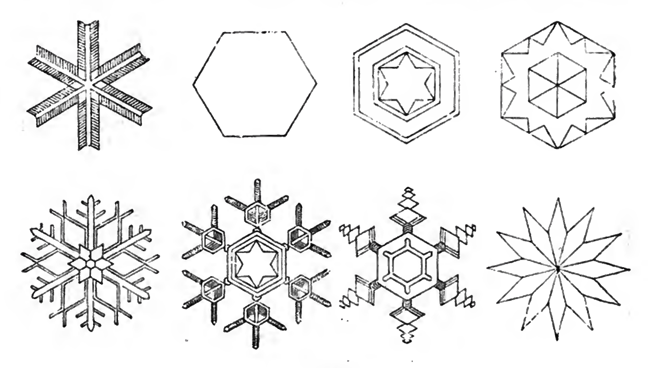


Fig. 212.

toujours jusqu'à nous; si elle rencontre dans sa chute des couches d'air moins froides que celles où elle a pris naissance, elle peut se liquéfier et nous arriver à l'état de pluie. Dans ce cas il neige sur les montagnes élevées et il pleut dans la plaine. Mais, dans l'hiver, les régions inférieures de l'atmosphère peuvent être assez froides pour que la neige les traverse sans se liquéfier et arrive à l'état solide, à la surface du sol, où elle forme une couche qui, par sa mauvaise conductibilité, protége les végétaux de gelées funestes.

297. **Grésil.** — Le grésil est formé de petites pelotes beaucoup plus compactes que la neige, et paraît dû à une congélation brusque de la vapeur vésiculaire se mélangeant avec un vent très-froid et animé d'une grande vitesse.

298. **Grêle.** — Quant à la grêle, qui accompagne souvent les

pluies d'orage, on l'attribue à des phénomènes électriques; mais on ne se rend pas compte encore d'une manière parfaite de tous les faits auxquels elle donne lieu.

290. **Rosée.** — On donne le nom de *rosée* à des gouttelettes d'eau que l'on trouve sur la plupart des corps exposés à l'air libre, *à la suite des nuits calmes et sereines.*

Un grand nombre d'hypothèses ont été faites pour expliquer sa formation. Les alchimistes recueillaient avec soin la rosée, qu'ils regardaient comme une exsudation des astres, dans laquelle ils espéraient trouver de l'or; d'autres ont admis que c'était une pluie très-fine venant des régions élevées de l'atmosphère ; d'autres enfin ont prétendu qu'elle s'élevait de terre. Les expériences du docteur Wells[1], confirmées plus tard par celles de Melloni, sont venues fixer l'opinion des physiciens sur cette question importante.

Wells, rapprochant le phénomène de la rosée du dépôt de vapeur condensée qui se forme à la surface des objets refroidis au milieu d'une atmosphère humide, les carreaux de vitre, par exemple, prétendit que la rosée ne se produisait sur un corps que lorsque celui-ci se refroidissait assez par rayonnement pour abaisser la température de l'air ambiant et l'amener à l'état de saturation ; qu'à partir de cet instant, si l'air continuait à se refroidir, la vapeur d'eau qu'il contenait se condensait en partis à l'état de rosée.

Wells a commencé par prouver que la rosée ne tombe par comme une pluie. Pour cela, pendant une nuit calme et sereine, deux flocons de laine de poids égaux furent placés l'un sur le sol et à l'air libre, l'autre au fond d'un cylindre de terre cuite. Au bout d'un certain temps le premier pesait plus que l'autre, et cependant si la rosée était tombée sur eux sous forme de pluie, celui qui était au fond du cylindre aurait reçu cette pluie en quantité égale à celle qu'aurait reçue l'autre, et l'augmentation de poids eût été la même dans les deux cas. L'hypothèse de Wells est parfaitement en rapport avec les résultats de l'expérience précédente ; en effet, le flocon placé à l'air libre rayonne dans tous les sens et l'atmosphère ne lui rend guère de chaleur, tandis qu'au contraire, le second flocon rayonnant vers les parois

1 Wells, médecin et physicien, né à Charlestown en 1753, mort à Londres en 1817.

du cylindre, une partie du calorique qu'il rayonne lui est renvoyée par ces parois, et le refroidissement doit être moindre pour lui que pour l'autre. Il en résulte qu'il produit une condensation moindre de la vapeur et par suite l'augmentation de poids qu'il subit est moindre aussi.

Du reste, Wells, pour montrer que les corps situés à la surface du sol se refroidissent par rayonnement beaucoup plus que l'atmosphère, plaça des thermomètres sur l'herbe courte, et d'autres à un mètre au-dessus du sol; ces derniers marquèrent une température supérieure de 4°, 5° et même 8° à celle qu'indiquaient les autres.

Nous ne décrivons pas toutes les expériences du docteur Wells, et nous citerons une expérience fort élégante de Melloni, qui confirme la théorie de Wells et réduit les autres à néant.

Il prit un disque en fer-blanc DD' (fig. 213) dont la partie centrale CC' était couverte d'une couche épaisse de vernis, dans une longueur égale au tiers du diamètre. Un autre disque en fer-blanc moins large de $10^{mm}$ que le cercle verni était maintenu à une distance de $5^{mm}$ au-dessus de ce dernier par un fil de fer. Cet appareil fut exposé horizontalement à l'air libre, par une nuit calme et sereine. La partie vernie, qui avait un pouvoir émissif plus grand que le métal, se refroidit et se couvrit la première de rosée; puis, le refroidissement se propageant par conductibilité, le dépôt de rosée se propagea aussi vers la circonférence et jusqu'à une certaine distance du centre. Quant à la face inférieure du disque DD', elle se couvrit de rosée exactement de la même manière que la face supérieure. Le disque supérieur restant sec, il est évident que la rosée ne tombe pas du ciel; car, dans ce cas, elle le recouvrirait comme le disque DD'. D'autre part, puisque le centre du disque DD' reste sec, *même sur sa face inférieure*, il est certain que la rosée ne s'élève pas du sol.

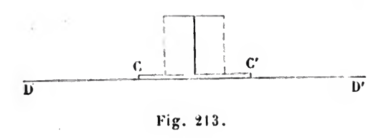


Fig. 213.

300. **Circonstances qui influent sur le dépôt de rosée.** — La théorie précédente permet d'expliquer toutes les circonstances qui influent sur le dépôt de rosée.

1° *Nature des corps.* Tous les corps n'ayant pas le même pou-

voir émissif ne se refroidissent pas également, et, par suite, la rosée doit se déposer fort inégalement sur eux ; c'est pour ce motif que les métaux, surtout lorsqu'ils sont polis, se recouvrent rarement de rosée ; le verre, l'herbe, le bois, les tuiles, dont le pouvoir émissif est plus considérable, produisent une condensation plus abondante de la vapeur d'eau.

2° *Influence de l'exposition des corps.* Quand un corps est abrité, qu'une partie du ciel lui est cachée, le dépôt de rosée à sa surface est faible ; car s'il rayonne dans tous les sens, la chaleur qu'il envoie vers l'abri lui est renvoyée par celui-ci, et son refroidissement est moindre que s'il n'était pas abrité. Les murs, les édifices abritent les objets placés auprès d'eux ; aussi la rosée est-elle bien moins abondante dans les villes qu'en rase campagne.

3° *Influence de l'état du ciel.* Quand le temps est couvert, les nuages jouent aussi le rôle d'abri par rapport aux corps situés sur le sol et le dépôt de rosée est plus faible.

4° *Influence du vent.* Si l'air est parfaitement calme, la même couche demeure toujours en contact avec le sol, et dépose seule la vapeur qu'elle contient : il en résulte que la rosée sera peu abondante. Si d'autre part l'air est très-agité, il en sera de même, parce que cette agitation facilite l'évaporation de la couche d'eau, à mesure qu'elle prend naissance. Une faible agitation de l'air présente donc les conditions les plus favorables au dépôt de la rosée.

5° *Influence de la saison.* Il est évident, d'ailleurs, que la quantité de rosée déposée sera d'autant plus grande que la différence entre la température du jour et celle de la nuit sera plus considérable ; elle est plus abondante à l'automne et au printemps qu'en hiver et en été.

301. **Givre ou gelée blanche.** — L'origine de la gelée blanche est la même que celle de la rosée. La gelée blanche se produit lorsque la température des corps, à la surface desquels s'est formée la rosée, est assez basse pour que celle-ci se congèle.

Les gelées tardives produites par le rayonnement pendant les nuits de printemps ont de funestes effets sur les végétaux ; un préjugé populaire attribue ces désastres à l'influence de la lune, et on l'appelle *lune rousse*, parce que les bourgeons et les feuilles

roussissent lorsqu'elle brille, tandis que, si elle reste masquée par les nuages, on ne remarque aucune désorganisation dans les végétaux. Est-il besoin d'ajouter que la lune n'a aucune influence en pareil cas, et que si les plantes ne souffrent pas lorsqu'elle est cachée, cela tient uniquement à ce que les nuages diminuent les effets du rayonnement et par suite le refroidissement des végétaux?

### INDICATIONS DU BAROMÈTRE.

302. Nous avons vu, en nous occupant du baromètre, que cet instrument servait à étudier les variations de la pression atmosphérique. Ces variations sont intimement liées à l'état de l'atmosphère; aussi les météorologistes enregistrent-ils avec soin les indications barométriques, et voici quelques-uns des résultats généraux auxquels ils sont parvenus.

Le baromètre est soumis, dans chaque lieu, à des oscillations continuelles. On appelle hauteur moyenne du jour la moyenne des hauteurs observées à chaque heure du jour et de la nuit. La moyenne mensuelle s'obtient en faisant la moyenne des moyennes des jours du mois, et la moyenne annuelle est la moyenne des moyennes mensuelles.

En chaque lieu la moyenne annuelle est constante, mais elle varie d'un point à l'autre du globe avec la différence des altitudes et avec celle des latitudes. Les moyennes mensuelles varient en un même lieu, dans le cours de l'année; elles sont généralement plus grandes en hiver qu'en été.

Quant aux hauteurs barométriques observées pendant une même journée, elles sont soumises à des oscillations très-régulières. Il y a deux minima, à quatre heures du matin et à quatre heures du soir, séparés par un maximum, qui s'observe à dix heures du matin et à dix heures du soir.

Outre ces variations régulières, il est des perturbations continuelles que le baromètre éprouve dans les climats tempérés. Elles ont un rapport remarquable avec l'état du ciel. Le mauvais temps a lieu ordinairement lorsque le baromètre baisse, le beau temps lorsqu'il monte. C'est de là que vient l'un des plus fréquents usages de l'instrument dont nous parlons. Aussi, comme nous l'avons remarqué plus haut, lui adapte-t-on souvent une gra-

duation spéciale qui indique l'état de l'atmosphère. Il ne faut accorder à ces indications, au point de vue météorologique, qu'une valeur de probabilité et non pas de certitude. Les prévisions faites sur le temps, d'après les indications du baromètre, sont le plus souvent exactes; mais elles peuvent être en défaut, et, en tous cas, l'instrument qui en fournit les bases doit-il avoir été gradué pour la région où se fait l'observation. C'est ce qui va ressortir de l'explication que nous allons donner.

Dans nos contrées, les vents humides et chauds du sud-ouest font baisser la colonne barométrique, parce qu'ils nous amènent un air moins dense; et, comme ils sont ordinairement accompagnés de grandes quantités de vapeur d'eau, cet abaissement concorde souvent avec la pluie. Mais il faut remarquer que cette vapeur ne tendrait qu'à augmenter la pression atmosphérique, et que, si celle-ci diminue, c'est que la cause d'abaissement, la température de l'air apporté par les vents, l'emporte sur la cause d'augmentation que nous venons de signaler. Par une raison contraire, les vents froids et secs du nord-est font monter le baromètre et amènent le beau temps. Mais n'oublions pas que cette règle est particulière à nos contrées et à celles qui se trouvent dans une même situation géographique par rapport aux mers, qui nous fournissent la plus grande partie de la vapeur d'eau atmosphérique. Ainsi, par exemple à l'embouchure de la Plata, sur la côte orientale de l'Amérique du Sud, ce sont les vents du sud-est qui amènent la pluie et qui, en même temps, font monter le baromètre, par suite de leur basse température.

---

# LIVRE TROISIÈME

## ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

---

## ÉLECTRICITÉ STATIQUE

---

# CHAPITRE PREMIER

## PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

303. Les anciens savaient que, lorsqu'on frotte un morceau d'ambre, il acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que des brins de paille, des fragments de papier, des barbes de plumes, etc... Mais ce fut pendant longtemps tout ce que l'on sut sur ce genre de phénomènes, dont l'étude devait plus tard faire l'objet de l'une des branches les plus importantes de la physique. Vers 1550, le docteur anglais Gilbert[1] reconnut que l'ambre ne jouissait pas exclusivement de la propriété dont nous venons de parler; que le verre, le soufre, la résine et un grand nombre de corps pouvaient aussi l'acquérir, et plus tard les expériences de Gray[2] en Angleterre, de Dufay[3] en France, enrichirent la science d'un grand nombre de faits nouveaux, dont l'explication fut successivement entreprise par Dufay, l'abbé Nollet[4], Jallabert[5], Franklin[6] et Æpinus[7].

[1] Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, né en 1540 à Colchester, mort en 1603.

[2] Gray, physicien anglais, vivait au dix huitième siècle.

[3] Dufay, membre de l'Académie des sciences, né à Paris en 1698, mort en 1739.

[4] L'abbé Nollet, membre de l'Académie des sciences, né dans le Noyonnais en 1700, mort en 1770.

[5] Jallabert (Jean). savant genevois, né en 1672, mort en 1768.

[6] Franklin, physicien et moraliste, né à Boston (Massachusetts), en 1706, mort en 1790.

[7] Æpinus, célèbre physicien, né en 1724, à Rostock, mort en 1802 à Dorpt, en Livonie.

304. **Phénomènes généraux.** — Si l'on prend un bâton de verre ou de cire d'Espagne et qu'on le frotte vivement avec un morceau d'étoffe de laine, ou avec une peau de chat, qu'on l'approche ensuite, soit de barbes de plumes, soit de petits morceaux de papier, ces corps seront attirés par le bâton de verre ou par le morceau de cire. Qu'on approche le bâton frotté de la joue, sans la toucher, on éprouve une sensation de chatouillement semblable à celui que causerait une toile d'araignée. Ces impressions deviendront plus sensibles si le bâton a des dimensions un peu considérables. S'il a été frotté longtemps, la sensation de chatouillement se change en picotements, et de petites étincelles lumineuses jaillissent entre le bâton et les organes. Mais avec le temps, le corps frotté perd ces propriétés et revient à l'état naturel.

On a désigné sous le nom d'*électricité* ou de *fluide électrique* la cause de ces phénomènes, et on dit que le bâton de verre et le morceau de cire d'Espagne sont *électrisés*, lorsqu'ils sont capables de produire les effets que nous venons de décrire. On ne devra pas perdre de vue, dans tout ce qui va suivre, que ces expressions ne renferment pas en elles-mêmes l'explication des phénomènes, que le mot *électricité* en désigne seulement la cause inconnue, que le mot *électrisé* exprime seulement un état spécial des corps, qui se manifeste lorsqu'ils ont été frottés.

On crut d'abord que les substances de la nature n'étaient pas toutes capables d'acquérir par le frottement la propriété d'attirer des corps légers, que cette propriété était l'apanage exclusif de quelques corps, que les métaux, les pierres, les organes des animaux et des végétaux en étaient dépourvus. On avait alors divisé les corps en corps *idio-électriques* ou électrisables par frottement et en corps *anélectriques* ou incapables de s'électriser. Cette distinction était basée, comme on va le voir, sur une observation imparfaite des phénomènes.

305. **Corps conducteurs, corps isolants.** — En 1727, Gray, électrisant un tube de verre fermé par un bouchon de liége, constata avec étonnement que le bouchon devenait capable d'attirer les corps légers, qu'une tige métallique plantée dans le bouchon acquérait aussi cette propriété, quoique le bouchon et la tige fussent incapables de s'électriser, lorsqu'on les frottait en les tenant à la main. Il constata aussi qu'une corde métallique longue de 866 pieds, soutenue par des cordons de soie, et électrisée à une de ses

extrémités, possédait bientôt les propriétés électriques dans toute sa longueur. L'un des cordons de soie s'étant rompu par accident, il le remplaça par un fil métallique; à partir de ce moment il lui fut impossible de développer de l'électricité à la surface de la corde.

Ces expériences ont conduit à une interprétation différente de celle que l'on adoptait jusqu'à Gray, et l'on admet maintenant que tous les corps sont capables de s'électriser par le frottement; que les uns, appelés corps *mauvais conducteurs* ou *isolants*, comme le verre, la gomme laque, la cire d'Espagne, etc..., opposent une grande résistance à la circulation du fluide à travers leur masse; que les autres, appelés corps *bons conducteurs*, comme les métaux, les pierres, les organes des animaux et des végétaux, laissent facilement circuler l'électricité.

Cette hypothèse permet d'expliquer la variété des effets qui se produisent lorsqu'on frotte un bâton de verre et un bâton de métal.

Lorsque, tenant d'une main une tige métallique, on la frotte de l'autre avec un morceau de laine ou une peau de chat, elle s'électrise; mais l'électricité, pouvant circuler facilement à travers le métal, corps bon conducteur, quitte bientôt les parties frottées, pour gagner les organes de l'opérateur, et se répandre de là dans le sol, que l'on a souvent désigné sous le nom de *réservoir commun*. On voit dès lors que l'électricité se disperse à mesure qu'elle se produit, et qu'il n'y a pas de raison pour que la tige métallique attire les corps légers. Dans le cas, au contraire, où l'on opère avec un morceau de verre, substance qui ne conduit pas bien l'électricité, celle-ci ne peut quitter les parties frottées pour se répandre dans le sol, et le bâton de verre conserve ses propriétés électriques.

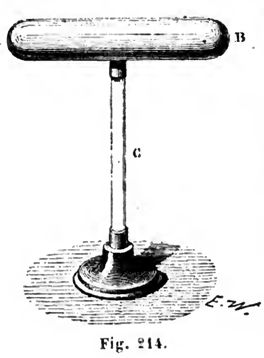


Fig. 214.

L'expérience suivante montre avec évidence l'exactitude de l'explication que nous venons de donner.

On prend un cylindre de métal AB (fig. 214) supporté par une colonne de verre enduite de gomme laque; on le frotte ou on le

percute avec une peau de chat bien sèche, et on constate qu'il devient capable d'attirer très-vivement des corps légers placés à faible distance. C'est qu'en effet, la colonne de verre enduite de gomme laque est un corps mauvais conducteur de l'électricité et qui empêche celle-ci de se répandre dans le sol, lorsqu'elle a été développée sur le cylindre AB. — Le cylindre est dit *isolé*.

Les expériences de Gray s'expliquent alors d'elles-mêmes: le bouchon et la tige métallique s'électrisaient parce qu'ils étaient supportés par un tube de verre isolant; la corde métallique, isolée par des cordons en soie, pouvait conserver l'électricité développée à sa surface; mais cette électricité la quittait, dès que l'un des cordons en soie était remplacé par un fil métallique.

L'air atmosphérique appartient évidemment à la classe des corps isolants; car, s'il livrait un passage à l'électricité, aucun corps plongé dans l'atmosphère ne pourrait donner lieu à des phénomènes électriques durables.

L'eau à l'état liquide ou de vapeur est, au contraire, un corps bon conducteur du fluide électrique, et c'est pour cette raison que les expériences d'électricité ne réussissent que difficilement dans un air humide. Nous devons, du reste, ajouter qu'il n'y a pas de substances qui soient entièrement dépourvues de la faculté de conduire le fluide électrique, que celles que l'on appelle isolantes ne sont que des substances le conduisant très-mal. Enfin la plupart des corps mauvais conducteurs deviennent conducteurs lorsqu'ils sont portés à une température suffisamment élevée; le verre, les cristaux, les gaz, les flammes conduisent l'électricité à la température rouge.

LISTE DES DIVERSES SUBSTANCES PAR ORDRE DE CONDUCTIBILITÉ DÉCROISSANTE.

| CONDUCTEURS | ISOLANTS |
|---|---|
| Métaux. | Oxydes métalliques secs. |
| Charbon calciné. | Glace. |
| Plombagine. | Marbre. |
| Acides. | Porcelaine. |
| Solutions salines. | Air et gaz secs. |
| Minérais métalliques. | Papier. |
| Eau. | Plumes. |
| Végétaux. | Cheveux, laine. |
| Animaux. | Soie. |
| Flamme. | Verre. |
| Vapeur d'eau. | Cire. |
| Air raréfié. | Soufre. |
| Verre pulvérisé. | Résine. |
| Fleur de soufre. | Ambre. |
| | Gomme laque. |

306. **Des deux espèces d'électricité.** — Les attractions électriques se changent en répulsions lorsque le corps léger attiré a touché le corps électrisé. Otto de Guericke a observé que, lorsque la barbe de plume attirée par un morceau de verre électrisé l'a touché, elle est subitement repoussée par lui. Dufay constata plus tard l'exactitude de ces observations, et nous pouvons répéter facilement ses expériences à l'aide du pendule électrique.

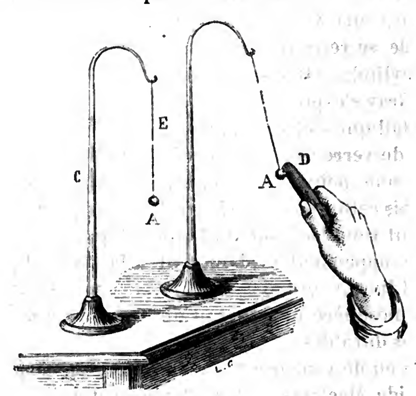


Fig. 215.

Il se compose essentiellement (fig. 215) d'une petite boule de moelle de sureau A, suspendue par un fil de soie E à une tige de verre C enduite de gomme laque. Présentons à la boule A un bâton de verre D électrisé par le frottement d'une étoffe de laine, la boule A est attirée, mais, dès qu'elle a touché le bâton de verre, elle est repoussée par lui comme le montre la figure 216. Pendant la durée du contact, la boule prend de l'électricité qu'elle conserve, puisqu'elle se trouve isolée par le fil de soie et la tige de verre du pendule; ce qui le prouve, du reste, c'est qu'elle est devenue elle-même capable d'attirer les corps légers, comme la sciure de bois. Bientôt elle se détache et fuit

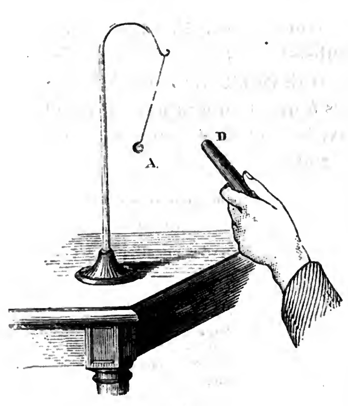


Fig. 216.

le bâton de verre qui l'attirait auparavant. Cette répulsion est due à l'électricité qu'elle a prise; car, si on la touche avec la main pour faire écouler le fluide dans le sol, elle devient de nouveau capable d'être attirée par le bâton de verre.

Mais si, pendant que la boule de sureau est repoussée par le verre, nous lui présentons un bâton de résine électrisé par le frottement d'une peau de chat, nous la voyons se précipiter vers lui.

Pareillement, si nous approchons du pendule non électrisé un bâton de résine frotté avec une peau de chat, la balle est attirée, repoussée après le contact, mais attirée de nouveau si nous lui présentons un bâton de verre frotté avec une étoffe de laine.

Ces expériences nous apprennent que le verre et la résine ont des actions opposées, puisque l'un attire ce que repousse l'autre, et réciproquement. Aussi les physiciens admettent-ils, pour expliquer ces faits, l'existence de deux électricités : l'une se développant sur le verre par le frottement, et désignée sous le nom d'électricité *vitrée* ou *positive*; l'autre se produisant sur un bâton de résine et appelée électricité *résineuse* ou *négative*.

Nous pouvons dès lors énoncer les lois suivantes, qui résument les phénomènes que nous venons d'étudier :

*Deux corps chargés de la même électricité se repoussent.*

*Deux corps chargés, l'un d'électricité résineuse, l'autre d'électricité vitrée, s'attirent.*

307. **Développement simultané des deux électricités.** — Puisqu'un corps frotté s'électrise, il est assez naturel d'admettre que le corps frottant s'électrise aussi. C'est, du reste, ce que démontre l'expérience suivante :

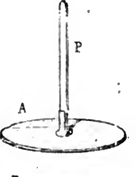


Fig. 217.

On fixe à l'extrémité de deux manches de verre bien isolants P,P′ (fig. 217) les deux substances sur lesquelles on veut opérer, par exemple, un disque de verre A et un disque de bois B couvert de flanelle. On les frotte l'un contre l'autre, puis on les sépare pour les présenter à un pendule électrique chargé d'électricité connue, d'électricité vitrée, par exemple, et l'on constate que le disque de verre A repousse le pendule, tandis que le disque de bois recouvert de flanelle l'attire. On en conclut que

les deux disques se sont électrisés à la fois, que le disque A s'est chargé d'électricité vitrée ou positive, que le disque B s'est chargé d'électricité résineuse ou négative.

308. Si le disque de bois avait été recouvert avec une peau de chat, les deux disques se seraient encore électrisés; mais, cette fois, le disque de verre se serait chargé d'électricité résineuse ou négative, et la peau de chat d'électricité vitrée ou positive. On voit donc qu'une même substance ne reçoit pas toujours la même électricité quand on la frotte avec des corps différents ; et, pour éviter toute confusion dans les termes, nous désignerons désormais par électricité positive celle que la laine développe par le frottement sur le verre, et par électricité négative celle qu'elle produit sur la résine. Le tableau suivant offre la liste d'un certain nombre de corps qui ont été rangés de telle sorte que chacun d'eux se charge d'électricité positive, quand on le frotte avec ceux qui le suivent, et d'électricité négative, quand on le frotte avec ceux qui le précèdent :

| | |
|---|---|
| Peau de chat. | Papier. |
| Verre poli. | Soie. |
| Étoffe de laine. | Gomme laque. |
| Plumes. | Résine. |
| Bois. | Verre dépoli. |

309. **Hypothèses sur le mode d'électrisation des corps.** — Pour expliquer tous les faits qui viennent d'être exposés, les physiciens admettent les hypothèses suivantes :

1° Tous les corps à l'état naturel contiennent une quantité indéfinie d'une matière impondérable et subtile que l'on a désignée sous le nom de fluide électrique neutre ; ce fluide est composé à parties égales de fluides positif et négatif qui se neutralisent.

2° Quand on frotte deux corps l'un contre l'autre, le fluide neutre du système se décompose ; le fluide positif passe sur l'un des corps, le fluide négatif sur l'autre.

# CHAPITRE II

## DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS.

310. Les travaux de Franklin ont prouvé que l'électricité donnée aux corps conducteurs isolés se porte tout entière à leur surface. Les expériences suivantes montrent l'exactitude de cette proposition.

311. Un conducteur creux A (fig. 218) est porté sur un pied isolant; il présente en C une petite ouverture. On l'électrise, et on vient appliquer en un des points de sa surface extérieure un petit disque de clinquant supporté par une aiguille isolante de gomme laque B. Ce petit disque, appelé *plan d'épreuve*, prend alors, au contact du conducteur, une certaine quantité d'électricité; ce que l'on vérifie en l'approchant d'un pendule électrique qu'il attire. Si, au lieu de toucher la surface extérieure du conducteur, on introduit le plan d'épreuve par l'ouverture C, afin d'établir le contact à l'intérieur, on constate que le plan d'épreuve ne prend pas d'électricité; il n'exerce plus d'attraction sur le pendule.

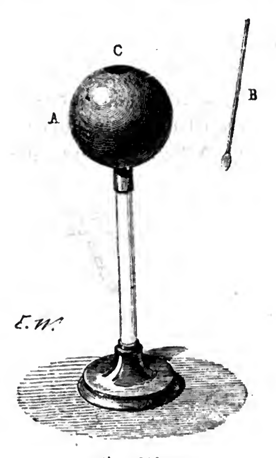


Fig. 218.

312. Souvent aussi on emploie l'appareil suivant, consistant en une sphère métallique isolée A (fig. 219) qui peut être exactement recouverte par deux hémisphères métalliques creux B et B', soutenus par des manches isolants C, C'. Ces hémisphères portent des échancrures destinées à laisser passer le pied de la boule A. On électrise la boule A; puis, sai-

sissant les deux hémisphères par les manches isolants, on recouvre avec eux la sphère; on les retire ensuite et l'on constate qu'ils sont électrisés, tandis que la boule A a perdu toute son électricité.

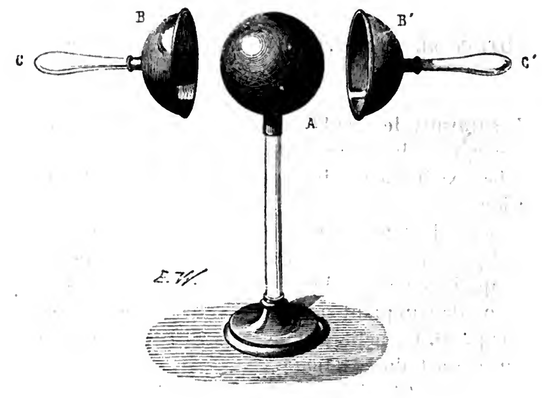



Fig. 219.

313. M. Faraday a aussi imaginé l'expérience suivante remarquable par son élégance et par sa simplicité. Un cercle métallique isolé A (fig. 220) supporte un petit sac conique de mousseline

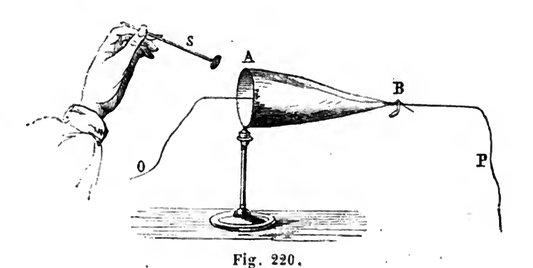



Fig. 220.

semblable aux filets à insectes. Un fil de soie OP placé dans l'axe du cône et attaché en B permet de retourner le filet en tirant par l'extrémité O du fil. On électrise le cercle A et par suite

le sac de mousseline. On constate avec le plan d'épreuve que la surface extérieure du sac est chargée d'électricité et que la surface intérieure n'en présente point. On retourne le sac de manière que la surface extérieure devienne intérieure et réciproquement et l'on constate que la surface extérieure seule est encore électrisée.

314. **Épaisseur, tension électrique.** — L'hypothèse que nous avons admise, relativement aux fluides électriques, explique parfaitement que ces fluides se portent à la surface des corps. En effet, lorsqu'un corps conducteur se charge d'électricité, les particules de même fluide, se repoussant l'une l'autre à travers les corps, gagnent la surface et s'y arrêtent. si l'air qui l'enveloppe est sec et par suite mauvais conducteur. S'il est humide, le fluide ne s'arrête pas à la surface, se répand dans l'atmosphère, et, au bout de peu de temps, le corps ne présente plus de traces d'électricité.

On admet que, si l'air est sec, le fluide viendra former à la surface du corps électrisé une couche dont l'épaisseur ou la densité y augmentera avec la quantité du fluide développée. On emploie indifféremment les mots *épaisseur* ou *densité électrique* pour exprimer la quantité de fluide qui, à un moment donné, est répandue sur l'élément de surface que l'on considère. On se sert aussi des mots *tension électrique*, qui expriment l'effort que fait l'électricité pour s'échapper du corps, effort qui augmente avec la quantité de fluide développée.

315. **Pouvoir des pointes.** — Les recherches faites par les physiciens, pour étudier la distribution de l'électricité à la surface des corps, les ont conduits aux résultats suivants :

Lorsqu'un corps électrisé présente des pointes ou des arêtes vives, l'électricité se porte en plus grande partie sur ces pointes et arêtes; elle y acquiert même une tension assez considérable pour triompher de la résistance de l'air et s'écouler au dehors.

L'écoulement de l'électricité par les pointes peut être rendu sensible par quelques expériences.

Une pointe électrisée laissant échapper le fluide, l'air qui la touche s'électrise et se trouve repoussé par elle; il s'ensuit que si cette pointe est placée sur un corps, où l'électricité se renouvelle à mesure qu'elle s'échappe, sur une machine électrique par exemple, il se produit dans son voisinage un courant d'air

que l'on peut mettre en évidence en approchant une bougie dont la flamme se trouve alors courbée et rejetée dans le sens du courant d'air (fig. 221).

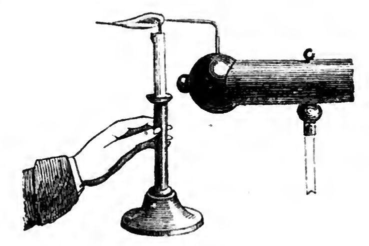


Fig. 221.

316. **Tourniquet électrique.** — On peut aussi opérer comme il suit : on fixe (fig. 222) au conducteur d'une machine électrique une tige effilée verticale *fe*, sur l'extrémité supérieure de laquelle se trouve placée une aiguille métallique *ab* libre de tourner sur *fe*. Les deux bouts de l'aiguille sont pointus et recourbés en sens inverse suivant *ac* et *bd*. Au moment où l'on charge la machine, l'aiguille, obéissant à la répulsion qu'exerce l'air sec sur ses extrémités, se met à tourner dans un sens inverse de la direction des pointes. On voit aussi des aigrettes lumineuses s'échapper des extrémités *c* et *d*. Cet appareil est souvent désigné par le nom de *tourniquet électrique*.

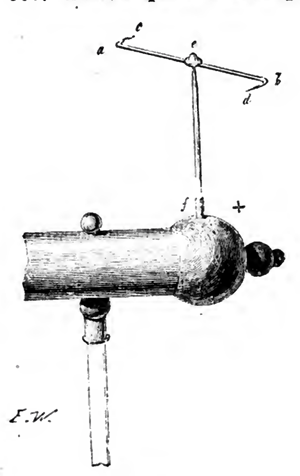



Fig. 222.

# CHAPITRE III

## DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE. ÉLECTROSCOPE. — MACHINES ÉLECTRIQUES.

317. **Électricité par influence.** — Un corps conducteur isolé ou non isolé, que l'on place en présence d'un corps électrisé et à une distance convenable, manifeste immédiatement lui-même des signes d'électrisation.

On dit alors que le cylindre est électrisé par *influence* ou par *induction*.

Dès 1733, Dufay et Gray avaient constaté le phénomène, mais il ne fut analysé que longtemps plus tard.

318. Soit un cylindre en laiton B (fig. 223), porté par une co-

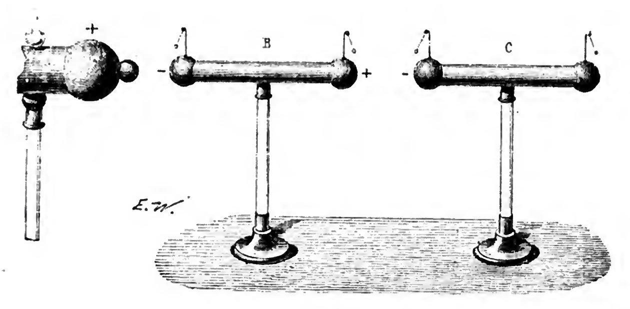



Fig. 223.

onne de verre et présentant à ses extrémités des petits pendules à balles de sureau suspendues à l'extrémité de fils conducteurs. Le cylindre étant à l'état neutre, les pendules sont verticaux. Présentons ce cylindre à un corps A chargé d'électricité positive. Immédiatement les pendules se relèvent, comme l'indique la figure, ce qui tient à ce que le cylindre s'est électrisé et que les balles sont repoussées par les supports des pendules chargés de

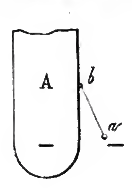
la même électricité qu'elles. Si on approche alors lentement du pendule antérieur un bâton de résine frotté, le pendule est repoussé, ce qui prouve qu'il est chargé d'électricité négative. Un bâton de verre approché du pendule postérieur le repousse aussi, ce qui prouve que celui-ci est chargé d'électricité positive.

Lorsque le cylindre porte des pendules sur toute sa longueur, on observe que leur écart diminue à mesure qu'on va des extrémités vers une région moyenne, appelée *ligne neutre*, et qui est toujours plus rapprochée de l'extrémité postérieure que de l'extrémité antérieure du cylindre [1].

319. Nous admettrons donc que, *lorsqu'un conducteur est présenté à un corps électrisé, son fluide neutre se trouve décomposé par influence. Le fluide de nom contraire à celui du corps électrisé se porte dans la partie la plus rapprochée de lui ; le fluide de même nom est repoussé dans la partie la plus éloignée.*

La théorie des deux fluides explique facilement les faits précédents. En effet, l'électricité positive de A (fig. 223), attirant les molécules négatives du fluide neutre de B, repousse les molécules positives, amène les premières dans la partie la plus voisine d'elle et repousse les secondes dans la partie la plus éloignée. La limite de charge est atteinte lorsque le fluide positif, qui se trouve dans la région postérieure de B, oppose aux molécules positives qui pourraient encore y arriver, une répulsion égale à la répulsion opposée par le fluide positif de A.

Les choses étant dans cet état, si l'on décharge brusquement le corps A, en le mettant en communication avec le sol, les pendules retombent immédiatement à la position verticale, le conducteur B revient à l'état neutre, les fluides séparés se recombinent instantanément.



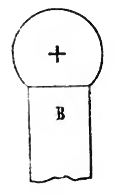




Fig. 224.

[1] Du reste, si l'on craignait que l'action attractive du corps A ne fût la cause de la divergence du pendule du plus voisin de lui, on pourrait, comme l'a indiqué M. Riess, opérer de la manière suivante. La figure 224 représente la disposition employée. Le conducteur isolé A est placé verticalement au-dessus du corps électrisé B et l'on voit le pendule *ab* s'éloigner du conducteur en même temps que du corps B.

320. **Effets qu'éprouve un corps électrisé par influence, lorsqu'on le touche avec un conducteur.** — Le cylindre B, étant soumis à l'influence du corps A, électrisé positivement, touchons-le avec le doigt ou avec un conducteur dans sa partie postérieure marquée du signe +, immédiatement le pendule de cette région retombe, et celui qui se trouve à l'autre extrémité diverge davantage. En effet, le fluide positif repoussé a dû être conduit dans le sol, et le fluide négatif a été maintenu dans la région antérieure ; mais, par suite de la disparition du fluide positif, qui, comme nous l'avons dit, a déterminé la limite de charge, par sa répulsion égale à celle du corps A, une nouvelle quantité de fluide neutre peut se décomposer, le fluide positif est repoussé dans le sol, et, une nouvelle dose de fluide négatif arrivant dans la région antérieure du cylindre, la divergence des pendules s'y trouve augmentée.

Enfin, si l'on supprime d'abord la communication avec le sol, et qu'on éloigne le cylindre du corps A, le cylindre reste chargé d'électricité négative, qui pouvant dès lors se répandre sur toute sa surface fait diverger tous les pendules.

Nous remarquerons enfin que les effets seraient encore les mêmes si, au lieu de toucher B à sa partie postérieure, on l'avait touché en un point quelconque, même en celui le plus voisin de A; car alors le système soumis à l'influence se composerait non-seulement du cylindre, mais du corps de l'opérateur et de la terre tout entière, et la ligne neutre serait reculée à l'infini.

321. **Un corps électrisé par influence agit à son tour pour électriser les corps voisins.** — Si au cylindre B (fig. 223), déjà électrisé par influence, on présente un cylindre C, semblable au premier, les mêmes phénomènes se produisent en lui. Cela tient à l'action du fluide positif accumulé dans la région postérieure de B et non à celle de A ; car si l'on enlève le cylindre B, sans bouger C, ce dernier retombe à l'état neutre.

## APPLICATIONS DES FAITS PRÉCÉDENTS.

322. **Communication de l'électricité à distance. Étincelle électrique.** — Reprenons la figure 223, et supposons que l'on approche B assez près de A ; une étincelle jaillit entre les deux corps, et B reste chargé d'électricité positive. Il peut sem-

bler alors que B ait reçu de A, par transmission directe et sous forme d'étincelle, une certaine quantité d'électricité; mais cette transmission directe n'est qu'apparente. Les principes que nous venons d'exposer nous permettent d'analyser le phénomène et d'en donner la véritable explication.

Le fluide neutre de B a été décomposé comme précédemment, mais, les deux corps ayant été rapprochés, la tension électrique sur A et sur la partie antérieure de B est devenue assez forte, pour que le fluide positif de A et le fluide négatif accumulé sur la partie antérieure de B aient pu vaincre la résistance de l'air intermédiaire, se précipiter à la rencontre l'un de l'autre et se combiner pour former du fluide neutre. La combinaison des deux fluides a développé de la chaleur et donné lieu à une étincelle. Quant au fluide qui, pendant l'influence et avant l'étincelle, se trouvait relégué dans la région postérieure de B, il peut après l'étincelle se répartir sur tout le cylindre, puisque le fluide positif de A a disparu pour reformer du fluide neutre.

Si le cylindre B, au lieu d'être isolé, était en communication avec le sol, il y aurait encore production d'une étincelle, mais le fluide positif qui, dans le cas précédent, restait sur le cylindre après l'étincelle, s'écoulerait dans le sol.

323. Lorsqu'on présente à une machine électrique en activité une tige métallique pointue, on voit une aigrette lumineuse sortir de la pointe et la machine se décharge. En effet, le fluide positif de la machine décompose par influence le fluide neutre de la tige et du corps humain, attire le fluide négatif dans la pointe et repousse le fluide positif dans le sol. Le fluide négatif s'écoule par la pointe et va neutraliser l'électricité positive de la machine. Cette expérience, due à Franklin, sera plus tard l'objet d'une importante application.

324. **Carillon électrique. Grêle électrique.** — Nous donnerons ici la description de deux expériences souvent faites dans les cours et qui se rattachent aux phénomènes d'électrisation par influence.

1° Aux extrémités d'une tige métallique horizontale sont suspendus par des chaînes métalliques deux timbres D, O (fig. 225) ; au milieu de cette tige se trouve suspendu par un fil isolant un timbre B qui communique avec le sol : dans l'intervalle des timbres sont suspendues aussi, à l'aide de fils isolants, des balles

métalliques. On attache l'appareil, à l'aide d'un crochet métallique, à une machine électrique qui fournit du fluide positif d'une manière continue. Dès qu'on met la machine en mouvement, les timbres D et O se chargent d'électricité positive, attirent les balles qui viennent les frapper, et qui sont ensuite repoussées par eux. Les balles s'éloignent, du reste, d'autant plus facilement des timbres D et O que le timbre B s'est chargé, sous l'influence de D et O, de fluide négatif, et attire alors les balles, qui viennent le frapper et qu'il repousse à son tour. Il en résulte un mouvement oscillatoire, qui est accompagné d'un carillon dû au choc des balles métalliques contre les timbres. Cette expérience est désignée sous le nom d'expérience du carillon électrique.

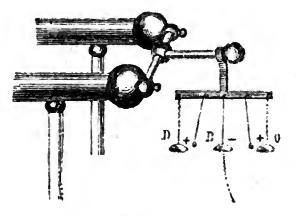


Fig. 225.

2° Une cloche tubulée (fig. 226) repose sur un plateau métallique, à la surface duquel se trouvent placées des balles de sureau ; à travers la tubulure passe une tige métallique terminée par une sphère, et que l'on met en communication avec une machine électrique. La tige chargée d'électricité positive décompose par influence le fluide neutre du plateau qui se charge, ainsi que les balles de sureau, d'électricité négative ; celles-ci s'agitent alors dans l'intérieur de la cloche, s'élèvent vers la sphère, retombent sur le plateau pour s'élever encore et ainsi de suite.

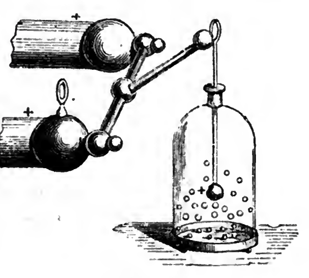


Fig. 226.

L'expérience connue sous le nom de danse des pantins électriques s'explique de la même manière ; la cloche est supprimée et remplacée par quatre colonnes isolantes qui soutiennent horizontalement un plateau métallique mis en communication avec la machine électrique. C'est entre ce plateau et le support de l'appareil que s'exécute le mouvement des pantins.

### ÉLECTROSCOPES.

325. On désigne, sous le nom d'électroscopes, des appareils qui servent à reconnaître : 1° si un corps est électrisé ; 2° de quelle espèce d'électricité il est chargé.

Dufay employait l'appareil que représente la figure 227. Il consiste en une aiguille de verre AB mobile sur la pointe d'un pivot vertical D qui la soutient en C. Elle porte à l'une de ses extrémités une sphère en cuivre creuse A, équilibrée par un contre-poids en verre B placé à l'autre extrémité.

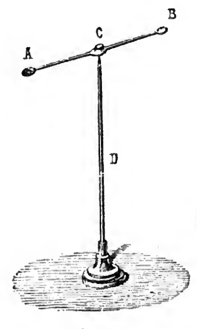


Fig. 227.

Pour savoir si un corps est électrisé, on l'approche de la sphère. S'il est attiré par elle, on conclut qu'il est électrisé. Pour déterminer ensuite la nature de l'électricité dont il est chargé, on communique à la boule A une électricité connue, positive, par exemple ; on approche le corps : s'il y a attraction de la sphère A, il est chargé d'électricité négative ; s'il y a répulsion, d'électricité positive.

326. L'électroscope le plus ordinairement employé est celui que nous allons décrire. Il est doué d'une sensibilité beaucoup plus grande que celui de Dufay.

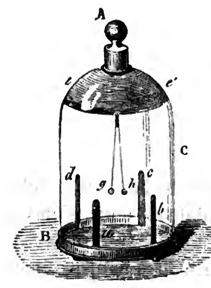


Fig. 228.

Une cloche tubulée C (fig. 228) repose sur un plateau métallique B. La tubulure reçoit un bouchon enduit de gomme laque traversé par une tige conductrice portant à sa partie supérieure une sphère métallique A, à sa partie inférieure, soit deux fils de métal terminées par des balles de sureau *g* et *h*, soit des lames d'or, soit des brins de paille. En *a*, *b*, *c*, *d* sont collées, contre la cloche et à l'intérieur, des lames minces d'étain qui touchent le plateau métallique B. Toute la partie supérieure de la cloche est recouverte en *e*, *e'* d'un vernis isolant à la gomme laque, et la cloche est

maintenue dans un état de siccité parfaite par de la chaux vive qu'on y laisse en permanence.

Voici maintenant comment on se sert de cet appareil. Si la boule A est à l'état neutre, et qu'on approche lentement d'elle un corps électrisé, le fluide neutre de la boule et de la tige est décomposé, le fluide de nom contraire à celui du corps est attiré dans la partie supérieure, le fluide de même nom repoussé dans les balles de sureau. Mais celles-ci qui, lorsqu'elles étaient à l'état neutre, devaient rester en contact, se repoussent aussitôt qu'elles reçoivent le même fluide, et on constate une divergence ; cette expérience peut seulement servir à reconnaître si un corps est électrisé ou non.

Quand on veut savoir de quelle électricité un corps est chargé, on commence par donner à l'électroscope une électricité connue, et on a recours pour cela à l'électrisation par influence. Voici comment on opère :

On approche un bâton de verre électrisé ; il attire le fluide négatif dans la boule A et repousse le fluide positif dans les balles qui s'écartent l'une de l'autre ; pendant l'influence, on touche avec le doigt la boule A. D'après les principes que nous avons développés dans la théorie de l'électrisation par influence, le fluide positif s'écoule dans le sol, les balles se rapprochent et il ne reste que l'électricité négative sur la boule A. On enlève ensuite le doigt et le bâton de verre, et l'électricité négative accumulée sur A peut alors se répandre dans les balles qui divergent de nouveau. L'appareil reste chargé de fluide négatif.

Pour reconnaître maintenant de quel genre d'électricité un corps est chargé, on l'approche de la boule. S'il est chargé négativement, il repoussera le fluide négatif de l'électroscope dans les lames et il y aura augmentation de divergence ; s'il est chargé positivement, il attirera le fluide de l'appareil dans la boule A et les balles se rapprocheront.

Nous devons toutefois faire observer que de ces deux effets un seul est concluant : c'est l'augmentation de divergence des balles ; car le rapprochement peut avoir lieu sans que le corps approché soit électrisé. Approchons en effet de la boule A un corps conducteur à l'état neutre, la main, par exemple ; elle s'électrise positivement sous l'influence du fluide négatif de l'électroscope, réagit alors sur ce fluide pour l'attirer vers elle dans la boule, par suite la divergence des balles diminue.

Il faut aussi observer que le rapprochement des balles, produit par un corps électrisé positivement, peut aussi se changer en une divergence. En effet, un bâton de verre frotté présenté à l'appareil produit une diminution de divergence des balles ; mais si on l'approche ensuite suffisamment, il les amènera d'abord au contact, puis opérera une décomposition nouvelle du fluide neutre de l'appareil, repoussera le fluide positif dans les balles, et la nouvelle divergence pourra être plus grande que la première ; de telle sorte que si, dans l'expérience, on n'a pas besoin d'approcher lentement le corps électrisé, les deux effets que nous venons de signaler se produiront nécessairement à un intervalle assez rapproché pour que le premier échappe à l'observateur qui, ne constatant alors qu'une augmentation de divergence, conclurait à tort que le bâton de verre était chargé d'électricité négative. Pour ces motifs, il sera toujours préférable de faire deux épreuves en chargeant l'électroscope d'abord positivement, puis négativement.

Enfin nous remarquerons qu'il arrive souvent, dans les expériences, que les balles vont toucher le verre de la cloche et y adhèrent assez longtemps pour gêner l'expérimentation, et que, lorsqu'elles s'en détachent, elles laissent à la surface de la cloche un fluide qui peut nuire à l'exactitude des observations. C'est pour remédier à cet inconvénient qu'on a soin de coller contre les parois intérieures de la cloche des petites bandes d'étain, *a*,*b*,*c*,*d*, qui communiquent avec le plateau métallique et qui font écouler dans le sol le fluide que les balles apportent dans leurs écarts extrêmes. Les feuilles d'étain sont souvent remplacées maintenant par de petites tiges métalliques fixées verticalement sur le plateau à une petite distance de la cloche.

## MACHINES ÉLECTRIQUES.

327. On donne le nom de *machines électriques* à des appareils construits de manière à produire, par le frottement, des quantités souvent considérables d'électricité, que l'on recueille sur des corps convenablement disposés.

Le premier appareil de ce genre a été construit par Otto de Guericke. Il consistait essentiellement en un globe de soufre A

(fig. 229) traversé par un axe métalique B. à l'aide duquel on pouvait lui imprimer un mouvement rapide de rotation. Pendant ce mouvement, on appuyait les mains sur le globe, et le frottement développait l'électricité.

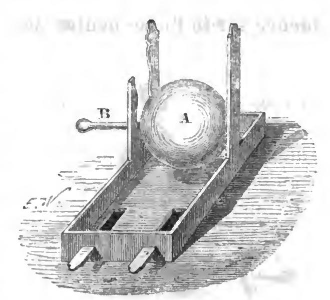


Fig. 229.

Les physiciens sont ensuite arrivés, par une série de perfectionnements, à donner à ces appareils une forme plus commode et à recueillir sur des conducteurs convenablement disposés l'électricité produite par le frottement.

Nous allons décrire la machine électrique la plus ordinairement employée.

328. **Machine électrique ordinaire.** — Elle se compose de trois parties principales : un corps frotté, un corps frottant et un réservoir d'électricité.

Le corps frotté consiste en une roue ou plateau de verre CC (fig. 230), fixé, à son centre, à un axe métallique D reposant sur des montants en bois verticaux B,B, et pouvant être mis en mouvement par une manivelle D. Les montants sont solidement fixés sur une table en bois. Cette roue passe à frottement entre deux paires de coussins *aa'*, *ee'*, fixées aux montants. Ces coussins constituent le corps frottant.

Le réservoir d'électricité consiste en gros tubes de cuivre A,A', G, portés par des colonnes de verre enduites de gomme laque et fixées sur la table en bois. Ces tubes, que l'on désigne sous le nom de conducteurs, forment, le plus souvent, les trois côtés d'un rectangle placé horizontalement au niveau du centre de la roue.

Les extrémités libres des conducteurs portent chacune un fer à cheval en cuivre *b*,*b'*, appelé mâchoire, dont les branches sont dans le plan horizontal du rectangle, embrassent chacune un rayon horizontal de la roue et portent à l'intérieur des pointes métalliques horizontales, qui vont aboutir à une faible distance de la roue, sans la toucher.

La roue étant mise en mouvement, les parties, qui ont passé

entre les frottoirs supérieurs se sont chargées, par le frottement, d'électricité positive. Ces parties sont bientôt amenées par la rotation entre les mâchoires. Là, leur fluide positif agit par influence sur le fluide neutre des conducteurs, repousse le fluide

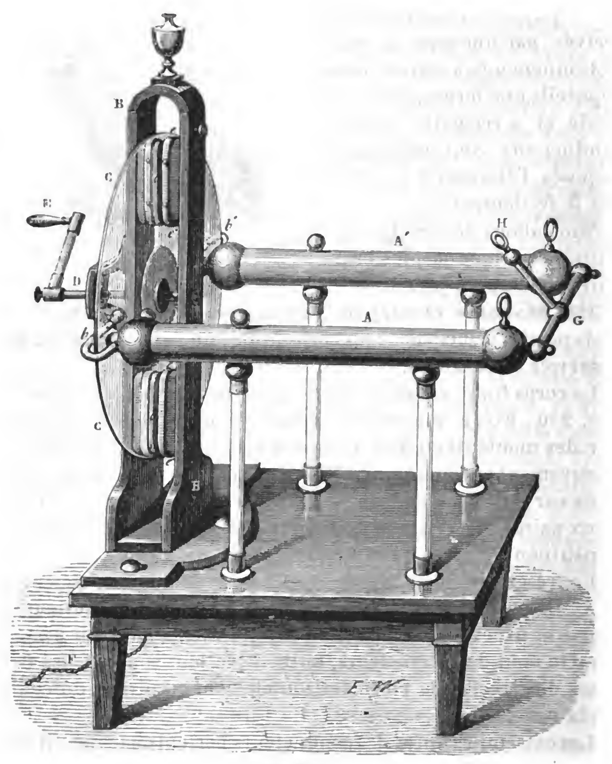



Fig. 230.

positif et attire le fluide négatif. Celui-ci, s'accumulant sur les pointes, y trouve un écoulement facile, se porte sur le fluide positif de la roue et le neutralise. Les parties de la roue, ainsi déchargées, viennent passer entre les coussins inférieurs, s'y

chargent de fluide positif et vont produire les mêmes phénomènes sur l'autre mâchoire.

La charge ne s'accroît pas indéfiniment ; elle a nécessairement une limite. D'abord, il arrivera un moment où le fluide positif, qui se trouve sur les conducteurs, contrariera l'action influente de l'électricité de la roue, en attirant à lui le fluide négatif qui tend à se porter sur les pointes. Il empêchera ainsi une nouvelle décomposition du fluide neutre des conducteurs. Si les coussins étaient isolés, la limite de charge serait rapidement atteinte; car le fluide négatif qui se trouve sur eux pourrait se communiquer à la roue et en diminuer la charge. Aussi a-t-on soin de les mettre en communication avec le sol par une chaîne métallique.

La déperdition du fluide des conducteurs par l'air et par les supports vient encore avancer la limite de charge des machines électriques. On la diminue autant que possible en plaçant des fourneaux sous les conducteurs, afin de dessécher l'air qui les environne. Enfin, on essuie les pieds de verre, avec des linges chauds et secs, pour leur enlever l'humidité qui les recouvre. Ces précautions sont surtout indispensables quand l'air est humide.

Pour juger, à chaque instant, de la charge de la machine, on adapte ordinairement à l'un des conducteurs un électroscope de Henley. Cet appareil, représenté par la figure 231, n'est autre qu'un pendule électrique ; il se compose d'une colonne de bois AB, qui porte une petite tige de bois à laquelle est suspendue une boule *a*. Cette tige est mobile, autour de son point de suspension, sur un cadran C. Quand cet appareil est fixé sur la machine, on voit le pendule diverger, dès qu'elle se charge, et sa divergence est évidemment d'autant plus grande que la tension du fluide des conducteurs est plus considérable.

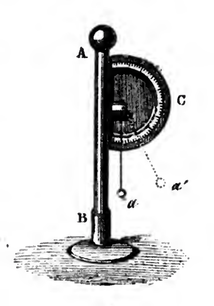


Fig. 231.

329. **Machine de Nairne.** — La machine de Nairne fournit à la fois les deux électricités. C (fig. 23.) est un cylindre de verre soutenu par un axe horizontal G, que l'on met en mouvement à l'aide d'une manivelle I. BB' est un conducteur de cuivre soutenu

par des colonnes isolantes de verre et porte un coussin contre lequel frotte le cylindre de verre C. A est un conducteur en cuivre isolé, armé de pointes qui viennent aboutir à une petite distance du cylindre C. Celui ci, en frottant contre le coussin que porte BB′, se charge d'électricité positive et laisse le fluide néga-

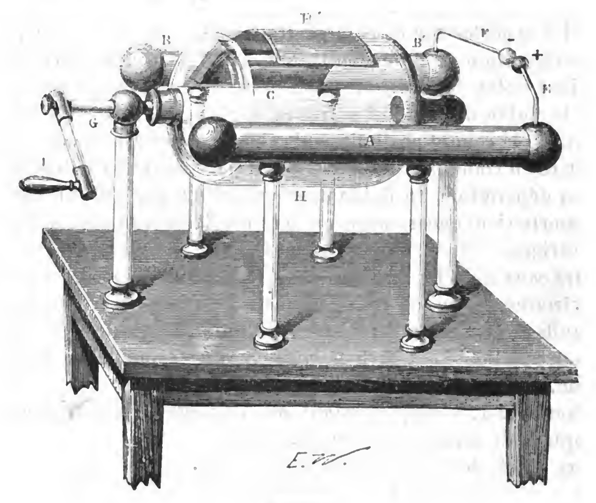


Fig. 232.

tif sur BB. Mais l'électricité positive du verre, en passant devant les pointes de A, détermine, comme dans la machine précédente, une décomposition du fluide neutre, et A se charge de fluide positif. Les tiges E et F étant rapprochées l'une de l'autre, on voit jaillir entre elles, pendant que la machine fonctionne, une série d'étincelles électriques.

330. **Machine hydro-électrique d'Armstrong.** — En 1839, le mécanicien W. Patterson, chargé de la conduite d'une machine à vapeur de la force de vingt-huit chevaux employée au service de la houillère Cramlington, près de Newcastle-sur-Tyne, remarqua que, tenant une main dans un jet de vapeur qui s'échappait par une fissure, et présentant l'autre à la paroi métallique de la chaudière, il pouvait tirer de celle-ci des étincelle.

MM. Armstrong et Faraday étudièrent le fait pour en rechercher la cause et trouvèrent qu'il y avait production d'électricité due

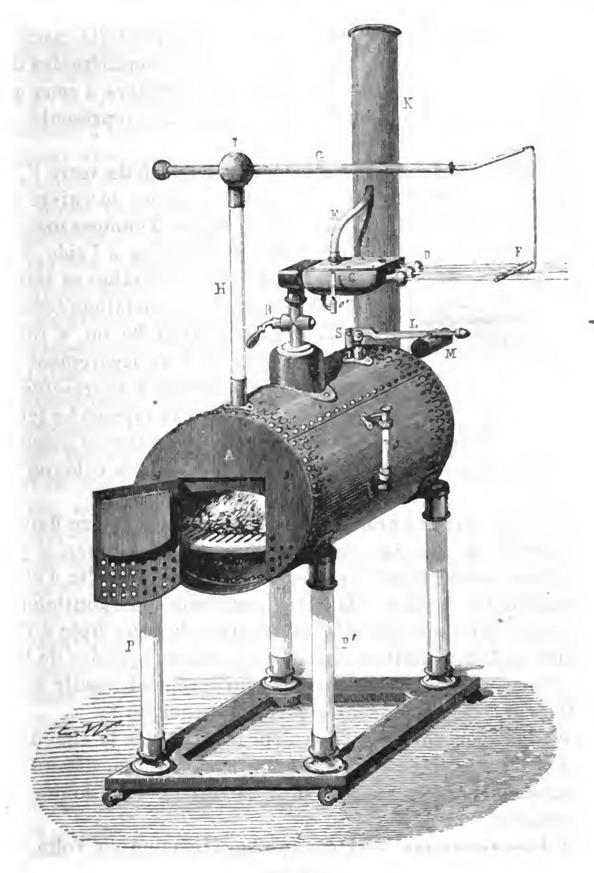



Fig. 233.

au frottement, sur les parois de la fissure, des gouttelettes d'eau entraînées par la vapeur. La présence de ces gouttelettes est nécessaire au développement de l'électricité ; car, si on chauffe les tu-

bes par lesquels la vapeur s'échappe, pour empêcher la condensation, on fait disparaître tout signe électrique. En partant de ces résultats généraux dus soit à ses propres expériences, soit à celles de M. Faraday, M. Armstrong construisit une nouvelle machine électrique capable de produire des quantités considérables d'électricité et de donner des résultats bien supérieurs à ceux que donnent les machines ordinaires. La figure 233 représente cet appareil.

Une chaudière à vapeur A, portée sur des pieds de verre P, P', communique, par un robinet B, avec trois tubes de cuivre qui traversent une boîte C, où ils sont enveloppés d'étoupes maintenues toujours humides à l'aide d'un peu d'eau froide. Ces tubes se terminent par une pièce métallique creuse fig. 234), dans laquelle on a introduit un tube de bois légèrement conique *ab*. La flèche A représente la marche suivie par la vapeur. Le jet de vapeur qui s'échappe de ces trois tubes est reçu sur un peigne F qui communique avec le cylindre G isolé par la colonne de verre H.

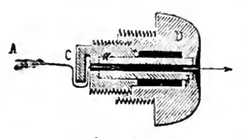


Fig. 234.

Lorsqu'on ouvre le robinet B, la vapeur qui doit être dans la chaudière à une pression assez forte, 7 ou 8 atmosphères, se précipite dans ces trois tubes ; en traversant la boîte remplie d'étoupes maintenues froides, elle laisse condenser des gouttelettes d'eau qui, entraînées par elle, arrivent sur la pièce fixée à l'extrémité des tubes, frottent contre les parois du cylindre de bois et se chargent d'électricité positive, qui se répand ensuite sur le conducteur isolé G, par l'intermédiaire du peigne F.

Il est indispensable que l'eau dont est chargée la chaudière soit de l'eau distillée ; l'eau ordinaire, contenant en dissolution des substances qui la rendent plus conductrice, ne donne pas d'électricité.

331. **Électrophore.** — L'électrophore imaginé par Volta permet d'obtenir la quantité d'électricité suffisante pour un grand nombre d'expériences. Il a l'avantage d'être facilement transportable, et d'une construction simple et peu coûteuse. Il se compose d'un gâteau de résine maintenu dans un moule de bois C C' (fig. 235), d'un plateau ou disque de bois P, recouvert d'une

feuille d'étain et soutenu en son centre par une tige de verre M enduite de gomme laque.

Pour charger cet appareil, on enlève le plateau P, on frotte avec une peau de chat le gâteau de résine qui se charge d'électricité négative, puis on pose sur lui le plateau P. Les phénomènes d'influence se produisent aussitôt : le fluide neutre de P est décomposé; son fluide positif, attiré par l'électricité de la résine, gagne la face inférieure du plateau; son fluide négatif, repoussé par elle, se porte sur la face supérieure. Si l'on soulevait alors ce plateau, les deux fluides soustraits à l'influence se recombineraient; mais si, avant de le soulever, on le met en communication avec le sol, nous savons que le fluide négatif repoussé doit disparaître, et que le plateau doit rester chargé d'électricité positive, qui se répandra également sur les deux faces, dès qu'à l'aide du manche en verre on l'aura soulevé et soustrait à l'influence du fluide négatif de la résine. Le doigt approché du plateau, après sa séparation d'avec le gâteau de résine, en tire une étincelle brillante, quand l'électrophore est bien chargé. On peut ensuite replacer le plateau P sur le gâteau C C′, et comme le fluide négatif de la résine ne s'est pas encore dissipé, par suite de la mauvaise conductibilité de cette substance, les mêmes phénomènes pourront se reproduire; on obtiendra une seconde étincelle, et ainsi de suite, tant que le gâteau restera chargé.

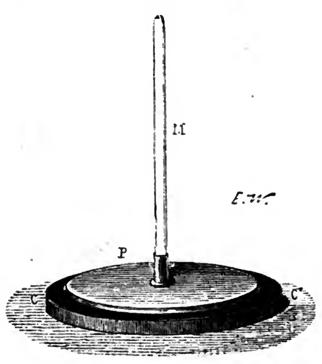


Fig. 235.

332. **Machine électrique de Holtz.** — Dans ces derniers temps M. Holtz a construit sur le principe même de l'électrophore une nouvelle machine électrique que l'on pourrait appeler *électrophore tournant*, en ce sens qu'au lieu d'avoir un mouvement alternatif du plateau, on a un mouvement continu de rotation qui permet à l'influence électrique de se répéter d'une ma-

nière continue et de produire des effets d'une grande intensité.

M. Bertsch a beaucoup simplifié l'appareil de M. Holtz, et la machine qu'il a construite produit aussi des effets très-intenses.

---

# CHAPITRE IV

## CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — BOUTEILLES DE LEYDE. — BATTERIES ÉLECTRIQUES.

333. Lorsqu'on met un conducteur métallique en communication avec une machine électrique en activité, le conducteur se charge d'électricité; mais, dès que la tension de l'électricité se trouve égale sur le conducteur à celle qui existe sur la machine, le conducteur cesse de se charger.

Il est facile de se rendre compte de ce phénomène. Considérons, en effet, une molécule de fluide située au contact de la machine et du conducteur; cette molécule se trouve repoussée en sens inverses, et par le fluide de la machine, et par celui qui est déjà parvenu sur le conducteur. La répulsion exercée sur la molécule en question par le fluide de la machine l'emporte sur celle qui est exercée par celui du conducteur, tant que la tension électrique de la machine est supérieure à celle du conducteur, et la molécule considérée est en quelque sorte poussée sur ce dernier. Mais, dès que ces tensions deviennent égales, la molécule, se trouvant également pressée dans les deux sens, reste immobile et la limite de charge du conducteur se trouve atteinte.

On désigne, en physique, sous le nom de *condensateurs*, des appareils qui permettent de reculer cette limite de charge, et d'accumuler sur eux des quantités considérables de fluides électriques.

L'invention de ces appareils est due à Cunéus et à Musschenbroëck, physiciens hollandais, qui, en 1746, voulant électriser

de l'eau, se servirent à cet effet d'une bouteille à moitié remplie de ce liquide, dans laquelle descendait une tige métallique. Cunéus tenait d'une main la bouteille, qui était mise en communication, par sa tige métallique, avec la machine électrique. Au bout d'un certain temps, jugeant que la charge était suffisante, il toucha avec l'autre main l'extrémité de la tige et reçut alors une violente secousse. Musschenbroëck fit à son tour l'opération, et reçut une commotion si violente qu'il écrivit à un de ses amis de Paris qu'il ne voudrait point renouveler l'expérience *pour tout l'or du royaume de France*. Cependant les deux savants physiciens continuèrent à étudier le phénomène, substituèrent à l'eau de la bouteille des lames minces de métal, des feuilles de clinquant, et recouvrirent sa surface extérieure d'une feuille d'étain destinée à augmenter la conductibilité (fig. 236).

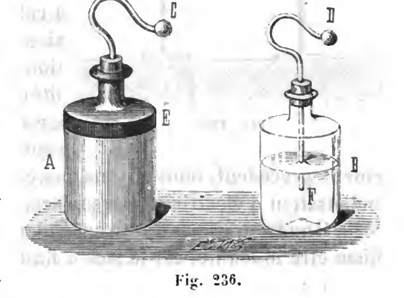


Fig. 236.

Toutes ces expériences se firent à Leyde, et c'est de là que l'appareil que nous venons de décrire tire son nom de *bouteille de Leyde*.

334. Expliquons maintenant sur quoi repose le jeu de cet appareil. Pour cela, donnons au condensateur une autre forme qui nous rendra l'explication plus facile, et qui est, du reste, souvent adoptée.

Supposons un plateau métallique A (fig. 237) porté par un pied isolant ; mettons-le en communication avec le conducteur D d'une machine électrique; d'après ce que nous avons dit plus haut, il atteindra bientôt sa limite de charge.

Cette charge électrique sera la même sur la face antérieure *a* et sur la face postérieure *a'*. Rompons maintenant la communication avec la machine et approchons un autre plateau métallique mis en communication avec le sol par une chaîne métallique *c* et séparé de A par une lame de verre VV'. Le fluide positif de A décompose par influence, à travers la lame de verre, le fluide

neutre de B, repousse dans le sol par la chaîne *c* le fluide positif et attire le fluide négatif sur la face *b*. Mais alors la distribution du fluide sur A ne peut rester la même que tout à l'heure ; car, le fluide négatif de la face *b*, réagissant à son tour sur le fluide positif de A, en attire la majeure partie sur la face *a*, et la tension électrique se trouve par suite presque annulée sur *a'*. Elle n'est plus égale à celle de la machine, et si l'on vient à rétablir la communication avec D, une nouvelle quantité de fluide positif pourra passer sur A ; comme nous pouvons répéter sur elle le raisonnement précédent, nous voyons que cet appareil produira une condensation d'électricité à sa surface.

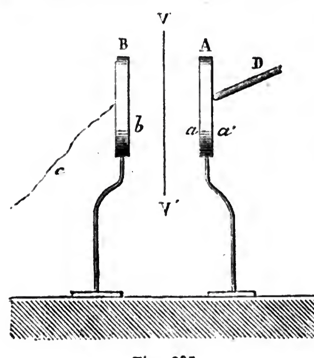


Fig. 237.

335. Il ne faudrait pas croire cependant que cette condensation puisse être indéfinie, car la face *a'* finit à la longue par acquérir une tension électrique égale à celle de la machine et la limite de charge se trouve définitivement atteinte.

336. **Décharges successives.** — Il est évident que, lorsque l'appareil est arrivé à cette limite de charge, la face postérieure de B est à l'état neutre et sur la face *b* se trouve accumulée une grande quantité de fluide négatif. Quant au fluide positif de A, nous pouvons le considérer comme divisé en deux parties, la majeure partie située sur la face antérieure *a*, le reste distribué sur *a'*, avec une tension égale à celle de la machine qui a chargé l'appareil. Mais l'action *simultanée* de ces deux parties est nécessaire pour retenir sur *b* le fluide négatif qui s'y trouve condensé. Si donc, la communication de B avec le sol étant rompue, nous venons à toucher du doigt la face *a'*, le fluide qui s'y trouve va se répandre dans le sol et elle reviendra à l'état neutre. Mais ce fluide agissait, avec celui de *a*, pour maintenir condensée sur *b* toute l'électricité négative qui s'y trouvait ; dès qu'il a disparu, une certaine quantité de fluide négatif quitte *b* et se répand sur *b'*. Les rôles sont alors changés : *a'* est à l'état neutre, et il faut toute

l'électricité des deux faces de B pour maintenir sur *a* la condensation. Si l'on touche la face postérieure de B, le fluide négatif qu'elle renferme s'écoule dans le sol, et par suite une certaine quantité de fluide positif quitte *a* pour aller sur *a'*. On comprend que, par ces contacts successifs, la charge de l'appareil aille constamment en diminuant. Du reste, à chaque contact, il se produit une étincelle, qui devient de moins en moins forte à mesure que le nombre des contacts successifs augmente.

337. **Décharge instantanée.** — La décharge instantanée s'obtient en mettant les deux plateaux en communication par un corps conducteur. On se sert ordinairement d'un appareil appelé *excitateur*, qui se compose de deux arcs métalliques AC, BD, articulés en E et portés à l'aide de manches isolants F et G (fig. 238). On saisit l'appareil par les manches F et G, on touche le plateau B avec la branche AC, par exemple, et on approche la branche BD du plateau A; une forte étincelle jaillit alors entre le plateau A et la branche BD. Cette étincelle paraît être unique; cependant, en réalité, il se produit une série d'étincelles comme dans la décharge successive; mais comme elles se succèdent avec une très-grande rapidité, les impressions qu'elles produisent sur l'œil et sur l'oreille se superposent, de telle sorte qu'on croit n'en voir et n'en entendre qu'une seule.

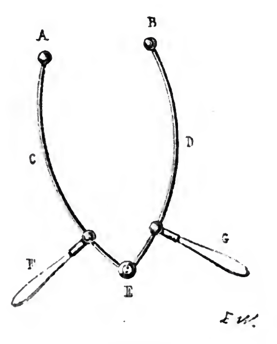


Fig. 238.

338. **Bouteille de Leyde.** — Tout ce que nous venons de dire pour expliquer la condensation de l'électricité sur un condensateur à plateaux s'applique évidemment à la bouteille de Leyde.

Il est facile de voir que les plateaux sont représentés, dans la bouteille de Leyde, d'une part, par les feuilles de clinquant et par la tige métallique qui plonge au milieu d'elles, d'autre part, par la feuille d'étain recouvrant le bocal de verre. Ce dernier représente, d'ailleurs, la lame de verre interposée entre les deux plateaux.

Pour charger une bouteille de Leyde, on la prend ordinaire-

ment à la main par la panse et l'on touche le conducteur de la machine avec le bouton qui se trouve à l'extrémité de la tige métallique plongeant dans l'intérieur de la bouteille.

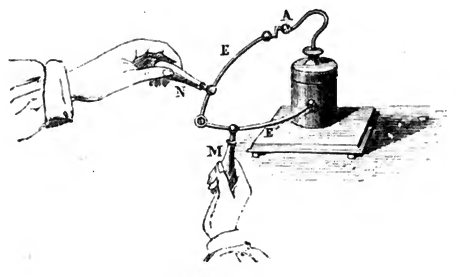



Fig. 239.

La décharge de la bouteille de Leyde peut se faire, comme pour le condensateur à plateau, soit par contacts successifs, soit instantanément.

La décharge instantanée se fait à l'aide de l'excitateur, comme l'indique la figure 239.

339. **Batteries électriques.** — Quand on veut obtenir de violentes décharges, on se sert de batteries électriques. Ces appareils se composent d'une série de bouteilles de Leyde de grandes dimensions, appelées jarres. Ces bouteilles sont placées dans une boîte AB (fig. 240), qui est tapissée d'une feuille d'étain, servant à mettre en communication toutes les armatures extérieures ; les armatures intérieures sont mises en communication par les tiges métalliques O H I K L. Quand on veut charger cet appareil, on met les armatures extérieures en communication avec le sol, en accrochant une chaîne métallique D à la poignée C de la boîte, puis on fait communiquer la tige F avec la machine électrique. Un électromètre G placé en L permet d'apprécier, par la divergence du pendule A, la tension de l'électricité libre.

340. **Les fluides résident sur le corps isolant du condensateur.** — Une bouteille de Leyde ou une batterie électrique n'est jamais ramenée à l'état neutre par une seule décharge. Si, au bout de quelque temps, on vient à toucher de nouveau les deux armatures à l'aide d'un excitateur, on obtient une nouvelle

étincelle; quelque temps après, on peut en obtenir une troisième, et ainsi de suite. Cela tient à ce que, pendant que la bouteille se charge, les fluides positif et négatif quittent les arma-

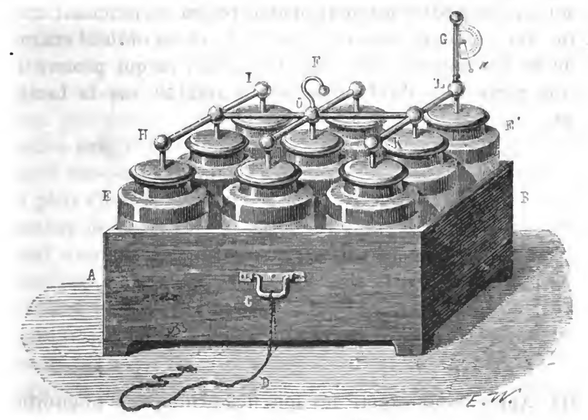



Fig. 240.

tures et s'engagent à la rencontre l'un de l'autre dans le verre. Au moment de la décharge, la faible conductibilité de la lame isolante les gêne dans leur mouvement, et il en reste toujours une certaine quantité dans le verre.

On peut vérifier l'exactitude de cette explication par l'expérience suivante, faite à l'aide de la bouteille à armatures mobiles.

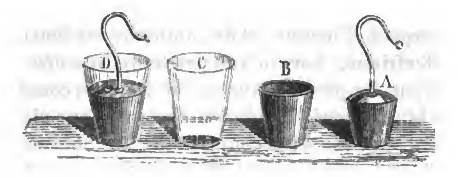



Fig. 241.

les. Un vase métallique B (fig. 241) forme l'armature extérieure; il reçoit un vase en verre C, dans lequel peut lui-même entrer un vase métallique A, formant l'armature intérieure.

Les choses étant ainsi disposées, on charge cet appareil comme une bouteille de Leyde ; on le place sur un gâteau de résine ; on enlève le vase intérieur A, puis le vase de verre, et on remet à l'état neutre les deux armatures, en les touchant avec la main. On remonte ensuite l'appareil, et on obtient encore, à l'aide de l'excitateur, une vive étincelle : ce qui prouve bien qu'une partie des fluides électriques résidait sur la lame de verre.

---

# CHAPITRE V

## EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ

341. Après avoir exposé les lois des principaux phénomènes électriques, il nous reste à étudier les effets que le fluide produit par son passage à travers les corps. Nous les diviserons :

1° En effets produits sur l'homme ou les animaux, ou effets *physiologiques* ; 2° en effets modifiant l'état physique des corps, ou effets *mécaniques*, *calorifiques et lumineux* ; 3° en effets *chimiques*, ou modifications apportées à la nature intime des corps.

### 1° EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

342. Le corps de l'homme et des animaux est bon conducteur du fluide électrique. Lorsqu'une personne, montée sur un tabouret isolé par des pieds de verre, est mise en communication avec la machine électrique, elle en devient, pour ainsi dire, le prolongement et s'électrise comme elle. Ses cheveux, chargés du même fluide, se repoussent mutuellement et se hérissent. Elle éprouve sur la peau et surtout au visage l'impression d'un souffle léger dû au redressement des petits poils ou du duvet qui se trouvent à la surface de la peau. On peut alors tirer de toutes les parties de son corps des étincelles qui produisent de légères commotions accompagnées de picotements.

Les mêmes sensations se produisent lorsqu'à l'aide du doigt on tire des étincelles d'une machine électrique en activité. La commotion est d'autant plus forte que l'étincelle part à une distance plus considérable. A une faible distance, elle peut n'être qu'une piqûre légère ; à une distance plus considérable, elle peut se faire sentir jusque dans le bras et même dans la poitrine.

Les commotions données par la bouteille de Leyde sont beaucoup plus fortes. Lorsque, tenant la bouteille par la panse, on touche avec l'autre main le bouton de l'armature intérieure, on reçoit une secousse qui est d'autant plus violente que la bouteille est plus chargée. Cette expérience se fait souvent sur un grand nombre de personnes à la fois. Il suffit pour cela qu'elles forment une chaîne continue en se tenant par les mains, que la première de la série tienne la bouteille par la panse, et que la dernière vienne toucher le bouton de l'armature intérieure. Au moment du contact, l'étincelle jaillit, et tous les individus composant la chaîne reçoivent une secousse, qui leur fait fléchir les membres et peut être ressentie jusque dans la poitrine, si la bouteille a été fortement chargée.

L'abbé Nollet fit, dit-on, cette expérience devant Louis XVI, sur un détachement de deux cent quarante gardes-françaises. On peut, avec des batteries électriques, tuer des animaux : chiens, lapins, etc. Leurs cadavres se putréfient avec la même rapidité que ceux des animaux foudroyés.

### 2° EFFETS MÉCANIQUES.

343. Ces effets consistent surtout dans la rupture, la dislocation des corps au milieu desquels on fait passer la décharge électrique. Ils se remarquent principalement sur les corps mauvais conducteurs, à cause de la résistance opposée par eux au passage de l'électricité. Nous allons en donner quelques exemples.

344. **Perce-carte.** — On dispose une carte entre deux pointes métalliques E et T (fig. 242), isolées l'une de l'autre par une tige de verre montée sur les douilles A et B. Tenant alors à la main la panse d'une bouteille de Leyde et une chaîne métallique en communication avec la pointe E, on touche le bouton C avec l'armature intérieure de la bouteille ; l'étincelle jaillit entre

les deux pointes, et la carte est percée d'un trou plus rapproché de la pointe négative que de la pointe positive.

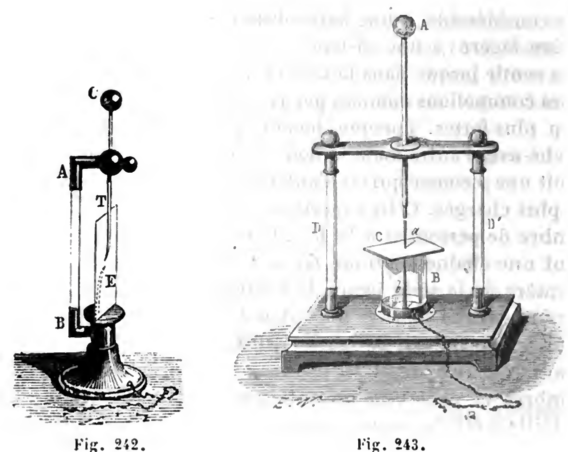



Fig. 242. Fig. 243.

345. **Perce-verre.** — Pour percer une lame de verre (fig. 243), il suffit de la placer sur le bord d'un vase en verre B, dont le fond est traversé par une pointe *b*, qui est en communication avec la chaîne E, et qui arrive presque au contact de la lame de verre. Une autre pointe *a*, isolée de la première par les colonnes de verre D, D′, est disposée au-dessus de la première. En opérant comme avec le perce-carte, on arrive à percer la lame de verre. Il est bon de mettre une goutte d'huile à l'extrémité de la pointe *a* ; ce liquide, mauvais conducteur de l'électricité, force les fluides à passer à travers la lame de verre. Quand on néglige cette précaution, ils contournent quelquefois la lame de verre et se recombinent à travers l'air.

346. **Thermomètre de Kinnersley.** — Le thermomètre de Kinnersley se compose de deux tubes de verre A et B (fig. 244), de diamètres très-inégaux, qui communiquent entre eux et contiennent un liquide coloré s'élevant au même niveau $x$ $x'$. A travers les douilles E et D du gros tube passent deux tiges métalliques se terminant par des boules *a* et *b* ; on fait jaillir l'étin-

celle d'une bouteille de Leyde ; l'expansion subite de l'air qui se trouve au-dessus du liquide déprime celui-ci dans le tube A, et, par suite de la différence des diamètres, une dépression même légère s'accuse par une ascension très-notable du liquide dans le tube B.

347. **Mortier électrique.** — Le mortier électrique se compose d'un petit mortier M (fig. 245) en ivoire,

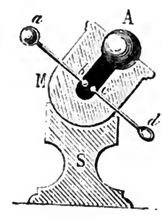


Fig. 245.

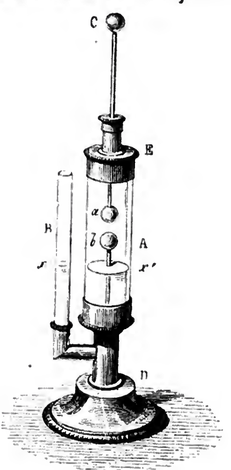


Fig. 244.

dans la cavité duquel on place une boule A. Au fond de cette cavité viennent aboutir en regard l'une de l'autre, et sans se toucher, des tiges métalliques *ab*, *cd* ; on fait jaillir entre *b* et *c* l'étincelle d'une bouteille de Leyde, et la boule d'ivoire se trouve projetée hors du mortier.

## 2° EFFETS CALORIFIQUES.

348. Le passage de la décharge électrique à travers un corps peut déterminer des phénomènes calorifiques, des élévations de température qu'il est intéressant d'étudier.

Une bougie qui vient d'être éteinte se rallume à l'instant, lorsqu'on tire une étincelle à travers sa mèche encore chaude.

Lorsqu'on présente à la machine électrique un vase métallique rempli d'éther ou d'alcool et qu'on fait partir une étincelle à la surface du liquide, celui-ci s'enflamme.

Avec la bouteille de Leyde ou les batteries, on produit des phénomènes calorifiques d'une plus grande intensité. On peut faire rougir, fondre et volatiliser des fils ou des feuilles métalliques.

On se sert souvent, à cet effet, de l'appareil représenté par la figure 246, et que l'on appelle *excitateur universel.*

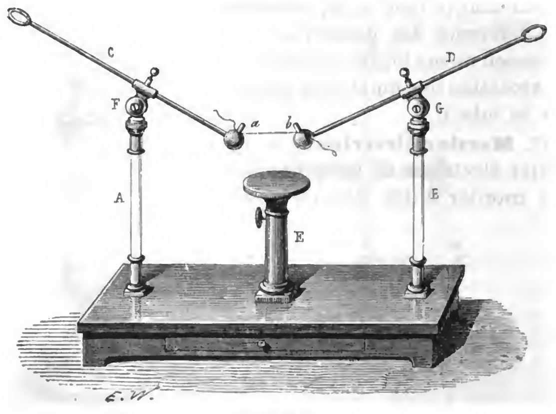



Fig. 246.

Deux tiges métalliques C et D sont isolées par des colonnes de verre A et B, au-dessus desquelles elles peuvent prendre différentes positions, grâce aux pièces articulées G, F, dans lesquelles elles passent à frottement. La tablette E peut servir à recevoir les corps sur lesquels on veut opérer.

Si l'on place sur cette tablette du coton poudre et qu'on y fasse passer l'étincelle, en mettant les deux tiges C et D en communication avec les armatures d'une batterie, ce corps s'enflamme.

Un fil de fer *a b*, tendu entre les tiges, peut, au moment du passage d'une faible décharge, s'échauffer sensiblement; une plus forte le fait rougir, et peut même le réduire en petits globules fondus qui sont projetés au loin. Les métaux les moins conducteurs, comme le platine et le fer, sont ceux sur lesquels on observe les phénomènes calorifiques les plus intenses.

349. On peut, au moyen de l'expérience suivante, mettre en évidence la volatilisation des métaux par le passage de l'étincelle.

Des découpures représentant le portrait de Franklin sont pratiquées à travers une carte qui se termine à ses extrémités par des lames d'étain *p*, *p'* (fig. 247). On la place entre une feuille

d'or qui touche l'étain par les deux bords et un ruban de satin. Pour bien assurer le contact, on met le tout en presse, en plaçant la pièce de bois A sur la pièce A' et en la serrant fortement à

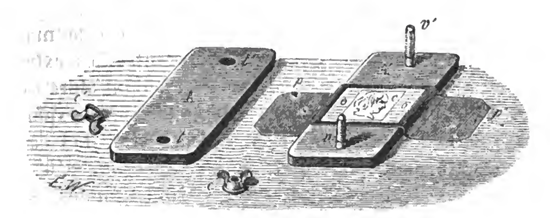


Fig. 247.

l'aide des vis *v*, *v'* et écrous *c*, *c'*, que représente la figure. Les deux bandes d'étain, *p*, *p'* étant mises en communication avec les armatures d'une batterie, l'étincelle part et traverse la feuille d'or, celle-ci se sublime, et sa vapeur passant à travers les découpures vient se condenser sur le ruban de satin et y reproduit le portrait de Franklin.

### 4° EFFETS LUMINEUX.

350. Quand l'électricité jaillit d'un corps vers un autre, à travers l'atmosphère, elle produit des phénomènes lumineux que nous avons déjà signalés à propos de l'étincelle électrique. Lorsqu'on approche d'une machine électrique un corps conducteur mis en communication avec le sol, et que la distance n'est pas trop grande, on obtient une série d'étincelles, qui se succèdent avec une rapidité telle qu'il en résulte pour l'œil la sensation d'un trait lumineux continu, un peu plus étroit en sa région moyenne qu'aux extrémités. Lorsque la distance est plus considérable, les étincelles se succèdent avec une rapidité plus ou moins grande, mais sont distinctes l'une de l'autre, et leur ensemble offre l'aspect de zigzags irréguliers.

On se sert souvent, dans les cours, d'appareils dans lesquels on multiplie le nombre des étincelles que fournit une machine, en multipliant les solutions de continuité du conducteur par lequel s'écoule le fluide.

Les tubes étincelants (fig. 248) sont des tubes en verre à l'intérieur desquels on a collé en spirale de petits losanges métalliques, dont les pointes sont en regard et à une très-petite distance l'une de l'autre. Tenant l'appareil par l'extrémité C, on présente le bouton D à la machine, les étincelles jaillissent alors entre les extrémités opposées des losanges et l'on aperçoit alors une spirale lumineuse d'un agréable effet. Ces expériences doivent être faites dans l'obscurité. Les carreaux étincelants, les globes étincelants (fig. 249 et 250) sont fondés sur le même principe.

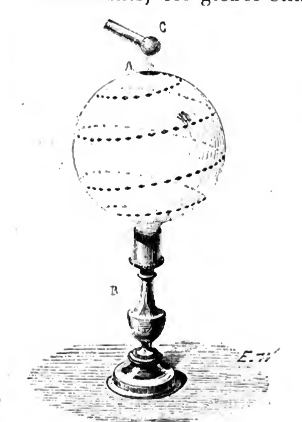



Fig. 248. Fig. 249.

**351. Lumière électrique dans le vide.** — Dans le vide, ou dans les gaz raréfiés, les phénomènes sont différents. On se sert, pour les étudier, de l'appareil connu sous le nom d'*œuf électrique*. Il se compose d'un globe de verre B (fig. 251), de forme ovoïde, muni de douilles métalliques *c* et *d*, à travers lesquelles passent des tiges métalliques, terminées à l'intérieur de l'œuf par des boules *a* et *b*; la tige A glisse à frottement dur dans la douille *c* et peut-être rapprochée plus ou moins de la tige *b*. La douille inférieure porte un robinet R; elle permet, à l'aide d'un pas de vis, de fixer l'appareil sur la machine pneumatique. On fait le vide dans cet appareil; puis, on présente le

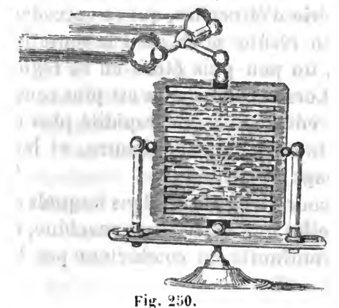


Fig. 250.

bouton A au conducteur de la machine électrique. Si la distance entre les boules *a* et *b* est peu considérable, on voit partir entre elles un jet de lumière violette, et la boule *b* semble s'entourer d'une auréole blanchâtre. Lorsque la distance est augmentée, la lumière pour aller de *a* en *b* se divise en plusieurs sillons violets du plus charmant aspect. L'auréole blanche qui entoure *b* diminue. Pour un écartement des boules plus considérable encore, on aperçoit une gerbe de lumière violacée renflée en son milieu.

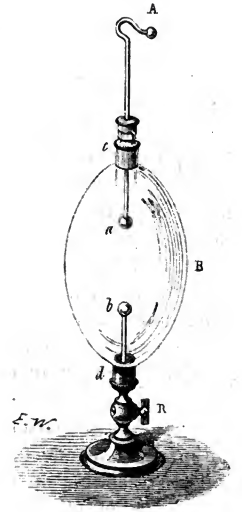


Fig. 251.

### 5° EFFETS CHIMIQUES.

352. L'étincelle électrique peut aussi modifier la composition des corps au point de vue chimique, produire la combinaison intime de corps simplement mélangés, en décomposer d'autres et ramener à l'état de mélange leurs éléments primitivement combinés.

Nous ne citerons que quelques-uns de ces effets.

L'eau est le résultat de la combinaison de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène. L'étincelle électrique peut servir à effectuer cette combinaison et à produire, en quelque sorte de toutes pièces, ce liquide si abondant dans la nature. On se sert, à cet effet, du *pistolet de Volta*, qui n'est autre qu'un vase métallique A (fig. 252), portant sur une de ses parois latérales une tubulure *b* dans laquelle se trouve mastiqué un tube de verre *cc'* ; ce tube laisse passer une tige métallique *aa'*, qu'il isole de l'appareil, et qui va aboutir à peu de distance de la

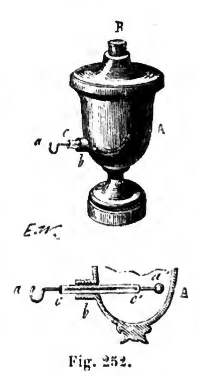


Fig. 252.

paroi opposée. On introduit dans l'appareil deux volumes d'hydrogène et un d'oxygène. On bouche fortement le vase à l'aide du bouchon B. On présente alors à la machine l'extrémité *a* de la tige *aa'*; une étincelle jaillit entre *a* et la machine, une autre entre *a'* et la paroi ; une violente détonation se fait entendre et le bouchon est projeté à une grande distance. L'étincelle qui a jailli en *a'* a effectué la combinaison des deux gaz ; la vapeur d'eau produite s'est subitement dilatée par l'élévation de température, a fait sauter le bouchon, et, par sa sortie brusque au milieu de l'air, en a déterminé l'ébranlement, cause de la détonation entendue.

353. Le liquide connu dans le commerce sous le nom d'alcali volatil ou ammoniaque n'est autre que de l'eau tenant en dissolution une quantité considérable d'un gaz désigné en chimie sous le nom de gaz ammoniac, et qui est composé de deux autres gaz appelés azote et hydrogène. Si on introduit, dans un appareil convenablement disposé, une certaine quantité de gaz ammoniac et qu'on y fasse passer une série d'étincelles électriques, on constate qu'elles effectuent la séparation des éléments combinés, que le gaz double de volume, qu'il a perdu les propriétés de l'ammoniaque, et n'offre plus que celles d'un mélange d'azote et d'hydrogène.

---

# CHAPITRE VI

## ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

354. En étudiant les phénomènes que nous venons de décrire, les expériences faites avec la bouteille de Leyde et les batteries, les propriétés de la lumière électrique, le lecteur n'a pas été sans trouver, entre ces effets et ceux de la foudre, des analogies frappantes. Ces analogies ont, depuis longtemps, attiré l'attention des physiciens.

Dès 1754, Gray, dans une lettre écrite à lord Mortimer et in-

sérée dans les *Transactions philosophiques*, dit *que le feu électrique* paraît être de la même nature que celui du tonnerre et des éclairs.

Le 7 novembre 1749, Franklin [1] écrivait sur son livre de laboratoire [2] :

« Propriétés communes au fluide électrique et à la foudre : 1° de rendre de la lumière ; — 2° la couleur de cette lumière ; — 3° la direction en zigzags ; — 4° la rapidité du mouvement ; — 5° sa facilité à se laisser conduire par les métaux ; — 6° le bruit ou craquement dans l'explosion ; — 7° de subsister dans l'eau ou dans la glace ; — 8° de déchirer les corps au travers desquels il passe ; — 9° de tuer des animaux ; — 10° de fondre les métaux ; — 11° d'allumer les substances inflammables ; — 12° l'odeur sulfureuse. »

En 1752, Franklin, se fondant sur un principe que nous avons exposé plus haut, fit commencer la construction d'une tour élevée dans les environs de Philadelphie. Au-dessus de cette tour devait être placée une tige métallique terminée en pointe à son extrémité supérieure. Il avait l'espoir que les nuages orageux qu'il supposait électrisés décomposeraient par influence le fluide neutre de la tige, et qu'elle donnerait à sa partie inférieure des signes d'électrisation. Mais la construction de la tour ayant subi des retards, il ne voulut pas en attendre l'achèvement et tenta l'expérience suivante.

Il fixa les quatre coins d'un morceau de tissu en soie à deux baguettes en verre armées d'une pointe métallique et y attacha une longue corde terminée à sa partie inférieure par un cordon isolant en soie ; il lança ce cerf-volant dans les airs par un temps orageux. Au début de l'expérience, la corde ne donnait aucun signe d'électricité ; mais, peu de temps après, une petite pluie fine étant venue à tomber, la conductibilité de la corde se trouva augmentée. Franklin vit les filaments de chanvre se dresser, et parvint à tirer de la corde des étincelles, avec lesquelles il put enflammer de l'alcool et charger des bouteilles de Leyde.

La même année, Dalibard, en France, réalisa la première expérience conçue par Franklin. Il fit construire, à Marly-la-

[1] Franklin, physicien et moraliste, né à Boston (Massachusetts) en 1706, mort en 1788.

[2] Œuvres de Franklin.

Ville, près de Paris, une cabane au-dessus de laquelle était placée une barre de fer isolée, haute d'environ 14 mètres, et dont la partie inférieure, lors du passage d'un nuage orageux, donna de nombreuses étincelles.

Canton, Charles, de Romas, répétèrent aussi ces essais. Ce dernier se servit d'un cerf-volant dont il avait rendu la corde conductrice en l'enlaçant avec un fil métallique. Il vit des brins de paille s'élancer vers la corde et tira de celle-ci de nombreuses étincelles à l'aide d'un conducteur en métal armé d'un manche isolant. « Imaginez-vous, écrivait-il à l'abbé Nollet, de voir des lames de feu de neuf ou dix pieds de longueur et d'un pouce de grosseur, qui faisaient autant ou plus de bruit que des coups de pistolet. En moins d'une heure, j'eus certainement trente lames de cette dimension, sans compter mille autres de sept pieds et au-dessous. »

Les expériences que nous venons de rapporter prouvent évidemment que les nuages orageux contiennent des quantités considérables d'électricité. Sans rechercher la cause de la production des fluides électriques dans l'atmosphère, nous ajouterons que les nuages sont tantôt électrisés positivement, tantôt négativement.

355. **Éclair.** — La foudre n'est autre que l'étincelle électrique jaillissant entre deux nuages chargés de fluides de nom contraires et exerçant l'un sur l'autre des actions d'influence, ou bien encore entre un nuage et un objet électrisé par lui.

La lumière de l'étincelle constitue l'*éclair*, l'explosion qui l'accompagne produit le tonnerre.

L'éclair affecte souvent la forme de zigzags. Tous les points de la ligne brisée qu'il embrasse nous apparaissent lumineux en même temps, quoique ces points soient situés à des distances bien inégales de l'observateur. Cela tient à la vitesse très-considérable de la lumière (77000 lieues de 4000 mètres à la seconde). On comprend qu'avec une vitesse de propagation aussi grande, la lumière nous parvienne *instantanément* de tous les points de l'éclair et que notre œil ne puisse apprécier l'intervalle de temps qui sépare l'arrivée des différents rayons lumineux.

La grande longueur de l'éclair s'explique par l'interposition entre le point de départ et le point d'arrivée d'une multitude de corps conducteurs, gouttes d'eau, etc., séparés l'un de l'autre par des molécules d'air non conductrices. Des étincelles jaillissent

entre chacun de ces corps, et le phénomène ne diffère que par les proportions de celui que nous produisons dans nos laboratoires avec les tubes étincelants.

La durée de l'éclair est excessivement courte. D'après les expériences de M. Wheastone, elle n'atteint pas la millionième partie d'une seconde.

356. Indépendamment des éclairs dont nous venons de parler et appelés éclairs de 1re classe, Arago distingue des éclairs de 2e classe, qui consistent en lueurs instantanées illuminant les nuages tantôt sur leur contour seulement, tantôt sur toute leur surface La couleur de ces lueurs est rouge, quelquefois violette ou bleuâtre; elles ne sont pas accompagnées de bruit perceptible. Ces éclairs sont considérés comme des décharges produites dans l'intérieur d'un nuage imparfaitement conducteur.

357. Les éclairs dits *éclairs de chaleur* sont produits par des orages lointains, dont le bruit n'arrive pas jusqu'à l'observateur.

On a aussi constaté quelques cas d'éclairs en boule. Ce sont des globes lumineux qui se déplacent assez lentement en général, et qui font explosion en lançant des éclairs dans l'espace. Voici un certain nombre de faits rapportés par M. Jamin et extraits en grande partie de la Notice d'Arago sur le tonnerre.

358. « I. En 1718, à Couesnon, près de Brest, sur les décombres d'une église entièrement détruite par la foudre, on s'accordait à attribuer la catastrophe à trois globes de feu de 3 ½ pieds de diamètre chacun, qui, s'étant réunis, avaient pris leur direction vers l'église d'une course très-rapide.

« II. En mars 1720, pendant l'orage le plus violent, un globe de feu tomba à terre, près de Horn; après avoir *rebondi*, ce globe alla frapper le dôme de la tour et y mit le feu.

« III. Le 3 juillet 1725, un orage ayant fondu sur le territoire d'Ayno, dans le Northamptonshire, le tonnerre tua un berger et cinq moutons. Au plus fort de la bourrasque, le révérend Jos. Wasse vit un globe de feu gros comme la lune et entendit le sifflement qu'il produisait dans l'atmosphère en passant au-dessus de son jardin. Une autre personne, située en plein champ, aperçut pendant le même orage un globe de feu gros comme la tête d'un homme qui éclata en quatre morceaux près de l'église.

« IV. Un coup de foudre endommagea fortement une maison de Darling (Surrey), 16 juillet 1750. Tous les témoins de l'évé-

nement déclarèrent qu'ils avaient vu dans l'air de grosses boules de feu autour de la maison foudroyée. En arrivant à terre ou sur les toits, ces boules se partagèrent en un nombre prodigieux de parties qui se dispersèrent dans toutes les directions possibles.

« V. A la suite d'un violent orage observé près de Wakefield, le 1[er] mars 1774, lorsqu'il ne restait plus dans tout le ciel que deux nuages peu élevés au-dessus de l'horizon, M. Nicholson voyait à chaque instant des météores semblables à des étoiles filantes descendre du nuage supérieur au nuage inférieur.

« Depuis l'époque où Arago signalait dans sa Notice ces singuliers phénomènes, on s'est occupé de les mieux observer, et voici quelques exemples récents qu'il est impossible de révoquer en doute. Le premier est raconté par madame Espert, cité Odiot, n° 1 :

« Passant devant ma fenêtre, qui est très-basse, je fus étonnée de voir comme un gros ballon rouge absolument semblable à la lune, lorsqu'elle est colorée et grossie par les vapeurs. Ce ballon descendait lentement et perpendiculairement du ciel sur un arbre des terrains Beaujon. Ma première idée fut que c'était une ascension de M. Grimm, mais la couleur du ballon et l'heure (6 heures 30 minutes) me firent penser que je me trompais, et pendant que mon esprit cherchait à deviner ce que cela pouvait être, je vis le feu prendre au bas de ce globe suspendu à 15 ou 20 pieds au-dessus de l'arbre. On aurait dit du papier qui brûlait doucement avec de petites étincelles ou flammèches ; puis, quand l'ouverture fut grande comme deux ou trois fois la main, tout à coup une détonation effroyable fit éclater toute l'enveloppe et sortir de cette machine infernale une douzaine de rayons de foudre en zigzags, qui allèrent de tous les côtés et dont l'un vint frapper une des maisons de la cité, où il fit un trou dans le mur comme l'aurait fait un boulet de canon : ce trou existe encore ; enfin, un reste de matière électrique se mit à brûler avec une flamme blanche, vive et brûlante, et à tourner comme un soleil de feu d'artifice. »

« Je termine ce sujet par un dernier fait raconté par M. Babinet...Voici en peu de mots le récit de l'ouvrier dans la chambre duquel le tonnerre en boule descendit pour remonter ensuite. Après un assez fort coup de tonnerre, mais non immédiatement après, cet ouvrier, dont la profession est celle de tailleur, étant

assis à côté de sa table et finissant de prendre son repas, vit tout à coup le châssis garni de papier qui fermait la cheminée s'abattre, comme renversé par un coup de vent assez modéré, et un globe de feu, gros comme la tête d'un enfant, sortir doucement de la cheminée et se promener lentement par la chambre, à peu de hauteur des briques du pavé. L'aspect du globe de feu était encore, suivant l'expression de l'ouvrier tailleur, celui d'un jeune chat de grosseur moyenne, pelotonné sur lui-même et se mouvant sans être porté sur ses pattes. Le globe de feu était plutôt brillant et lumineux qu'il ne semblait chaud et enflammé, et l'ouvrier n'eut aucune sensation de chaleur. Ce globe s'approcha de ses pieds, comme un jeune chat qui vient jouer et se frotter aux jambes, suivant l'habitude de ces animaux ; mais l'ouvrier écarta les pieds, et, par plusieurs mouvements de précaution, mais tous exécutés, suivant lui, très-doucement, il évita le contact du météore. Celui-ci paraît être resté plusieurs secondes autour des pieds de l'ouvrier assis, qui l'examinait attentivement, penché en avant et au-dessus. Après avoir essayé quelques excursions dans divers sens, sans cependant quitter le milieu de la chambre, le globe de feu s'éleva verticalement à la hauteur de la tête de l'ouvrier, qui, pour éviter d'être touché au visage, et en même temps pour suivre des yeux le météore, se redressa en se renversant sur sa chaise. Arrivé à la hauteur d'environ un mètre au-dessus du pavé, le globe de feu s'allongea un peu et se dirigea obliquement vers un trou percé dans la cheminée, environ à un mètre au-dessus de la tablette de cette cheminée.

« Ce trou avait servi à faire passer le tuyau d'un poêle qui, pendant l'hiver, avait servi à l'ouvrier. Mais, suivant l'expression de ce dernier, le tonnerre ne pouvait pas le voir, car il était fermé par du papier qui avait été collé dessus. Le globe de feu alla droit à ce trou, décolla le papier sans l'endommager, et remonta dans la cheminée. Alors, suivant le dire du témoin, après avoir pris le temps de remonter dans la cheminée du train dont il allait, c'est-à-dire assez lentement, le tonnerre, arrivé au haut de la cheminée, qui était au moins à vingt mètres du sol de la cour, produisit une explosion épouvantable qui détruisit une partie du faîte de la cheminée et en projeta les débris dans la cour... »

359. **Tonnerre.** — Les éclairs de première classe sont ordi-

nairement suivis de bruits plus ou moins intenses qu'on désigne ordinairement sous le nom de *tonnerre*. L'intervalle qui sépare l'éclair du tonnerre est dû à la différence des vitesses de propagation de la lumière et du son. Le son ne parcourant que 340 $^{m}$ à la seconde, le bruit produit par l'étincelle n'arrive à l'oreille de l'observateur qu'après que la lumière de l'éclair, qui parcourt 77 000 lieues dans le même temps, est arrivée à son œil. Il est évident que l'intervalle entre les deux sensations est d'autant plus grand que la distance à laquelle se produit l'éclair est plus considérable.

Le bruit de l'étincelle électrique est ordinairement sec, tandis que le bruit du tonnerre se compose d'éclats successifs, suivis par un grondement sourd qui va en s'affaiblissant. C'est ce que l'on exprime par les mots *roulements de tonnerre*. Cette différence entre l'étincelle électrique et le tonnerre s'explique facilement. Le bruit de l'étincelle, partant de points qui sont sensiblement à la même distance de l'observateur, arrive de tous ces points en même temps à l'oreille et doit par suite être sec ; celui de l'éclair, partant de points très-inégalement éloignés, doit être saccadé et se composer de bruits successifs inégalement forts.

360. **Influence des nuages orageux sur des objets situés à la surface du sol.** — Les phénomènes que nous venons d'étudier sont dus surtout à l'action réciproque des nuages électrisés. Il est intéressant d'examiner l'influence que ceux-ci peuvent avoir sur le sol et sur les objets situés à sa surface. Quand un nuage électrisé se trouve assez rapproché de la terre, il opère une décomposition du fluide neutre du sol, attire dans la partie supérieure du fluide de nom contraire à celui dont il est chargé, et repousse au loin le fluide de même nom.

Il arrive souvent que l'attraction entre les deux fluides opposés des nuages et des parties supérieures du sol soit assez grande, pour que la résistance de l'air soit vaincue, qu'il y ait recomposition et par suite éclair. Le point du sol où aboutit l'étincelle électrique est dit *foudroyé*. On dit aussi que la foudre est tombée sur ce point. Quand le tonnerre tombe sur un point qui n'est pas trop éloigné de l'observateur, celui-ci perçoit un bruit sec dû à ce que toutes les parties de l'éclair sont sensiblement à des distances égales.

Il est évident que les objets les plus élevés, étant ceux sur les-

quels l'action décomposante des nuages s'exercera le plus facilement, sont aussi les plus exposés à être foudroyés.

361. **Choc en retour.** — Supposons que, pendant qu'un corps est électrisé par l'influence d'un nuage orageux situé au-dessus de lui, ce nuage soit brusquement emporté par un coup de vent, il est facile de concevoir que les fluides positif et négatif de cet objet, étant soustraits à l'action du nuage qui les maintenait séparés l'un de l'autre, se recombineront instantanément. Cette recomposition instantanée est accompagnée d'ébranlements dont les suites peuvent être funestes. On a vu des troupeaux entiers, des attelages de plusieurs chevaux, des groupes nombreux de personnes, succomber dans ces circonstances, sans qu'on retrouve à la surface de leur corps aucune blessure apparente. Ce phénomène est connu sous le nom de choc en retour.

Nous empruntons encore au traité de physique de M. Jamin une série de faits intéressants qui donneront une idée des effets des nuages orageux et de la foudre.

362. **Effets des nuages orageux sur le sol.** — La décomposition par influence que les nuages orageux peuvent exercer sur les objets situés à la surface du sol suffit pour expliquer les faits suivants :

« Sénèque raconte qu'une étoile alla près de Syracuse se reposer sur le fer de la lance de Gylippe.

« On lit dans Tite-Live que le javelot dont Lucius Atreus venait d'armer son fils, récemment enrôlé parmi les soldats, jeta des flammes pendant plus de deux heures sans être consumé.

« César, dans ses Commentaires sur la guerre d'Afrique, raconte qu'après une nuit orageuse pendant laquelle il tomba beaucoup de grêle, le fer des javelots de la 5e légion parut en feu.

« Plutarque rapporte qu'au moment où la flotte de Lysandre sortait du port de Lampsaque pour attaquer la flotte athénienne, les deux feux que l'on appelle Castor et Pollux allèrent se placer des deux côtés de la galère de l'amiral lacédémonien; ceci présageait dans les idées du temps un heureux voyage.

« On trouve dans l'histoire de Christophe Colomb, écrite par son fils, le récit d'une observation analogue. Dans la nuit du samedi (octobre 1493), il tonnait et pleuvait très-fortement. Saint Elme se montra alors sur le mât de perroquet avec sept cierges allumés, c'est-à-dire qu'on aperçut ces feux que les matelots

croient être le corps du saint. Aussitôt on entendit chanter sur le bâtiment force litanies et oraisons, car les gens de mer tiennent pour certain que le danger de la tempête est passé dès que saint Elme paraît. Il en sera de cette opinion ce qu'on voudra.

« On se fit pendant longtemps une opinion très-étrange de ces feux, que l'on regardait comme des objets matériels dont on pouvait aller se saisir. Pour montrer cette idée dans toute sa naïveté, il suffit de citer le passage suivant des Mémoires de Forbin.

« Pendant la nuit (1696) il se forma tout à coup un temps très-noir accompagné d'éclairs et de tonnerres épouvantables. Dans la crainte d'une grande tempête dont nous étions menacés, je fis carguer toutes les voiles. Nous vîmes sur le vaisseau plus de trente feux Saint-Elme. Il y en avait un entre autres sur le haut de la girouette du grand mât qui avait plus d'un pied et demi de hauteur. J'envoyai un matelot pour le descendre. Quand cet homme fut en haut, il cria que ce feu faisait un bruit semblable à celui de la poudre qu'on allume après l'avoir mouillée. Je lui ordonnai d'enlever la girouette et de venir; mais à peine l'eut-il ôtée de place, que le feu la quitta et alla se reposer sur le bout du mât, sans qu'il fût possible de l'en retirer. Il y resta assez longtemps, jusqu'à ce qu'il se consumât peu à peu.

« Des observations plus précises ne laissent aucun doute sur l'origine de ces phénomènes. Je vais encore citer deux exemples :

« Le 14 janvier 1824, à la suite d'un orage, M. Maxadorf, ayant porté ses regards sur un chariot chargé de paille qui se trouvait au-dessous d'un gros nuage noir au milieu d'un champ près de Cothen, observa que tous les brins de paille se redressaient et paraissaient en feu. Le fouet même du conducteur jetait une vive lumière. Ce phénomène disparut aussitôt que le vent eut emporté le nuage noir ; il avait duré dix minutes.

« Le 8 mai 1831, après le coucher du soleil, des officiers se promenaient tête nue pendant un orage sur la terrasse du fort Bab Aâoum à Alger. Chacun, en regardant son voisin, remarqua avec étonnement de petites aigrettes lumineuses aux extrémités de ses cheveux tout hérissés. Quand ces officiers levaient les mains, des aigrettes se formaient aussi au bout de leurs doigts. »

363. **Effets de la foudre sur les corps conducteurs.** — « Quand la foudre rencontre des corps métalliques, elle les fond et les volatilise si leur section est petite; elle les suit sans inter-

ruption et sans occasionner de dégâts s'ils ont une masse assez grande et qu'ils soient en communication avec le sol : elle se dirige de préférence vers les corps conducteurs.

« Aristote dit que l'on a vu le cuivre d'un bouclier fondu par le tonnerre sans que le bois qu'il recouvrait fût endommagé. Suivant Pline, l'argent, l'or et le cuivre contenus dans un sac peuvent se fondre par la foudre sans que le sac soit brûlé, sans que la cire, empreinte d'un cachet qui ferme le sac, soit ramollie.

« Le 27 avril 1807, le tonnerre tomba sur un moulin à vent de Treat Warton, dans le Lancashire; *une grosse chaîne en fer*, qui servait à hisser le blé, fut tellement échauffée et ramollie que les anneaux se joignirent et qu'elle devint après le coup de foudre une véritable barre de fer.

« Le 19 avril 1827, le paquebot *New-York*, de 520 tonneaux, venant à Liverpool reçut deux coups de foudre successifs dans la même journée. Au premier coup, n'ayant point de paratonnerre, il éprouva de graves dégâts, et un tuyau de plomb, qui avait 8 centimètres de diamètre et 13 millimètres d'épaisseur, qui conduisait du cabinet de toilette à la mer, fut mis en fusion.

« Au deuxième coup, le paratonnerre avait été mis en place; il se composait d'une tige en fer de 1 mètre 20 et de 11 millim. et d'une chaîne d'arpenteur longue de 40 mètres qui réunissait le paratonnerre à la mer; elle était faite avec du fil de fer de 6 millimètres de diamètre et les chaînons se reliaient les uns aux autres par des anneaux ronds. Tout le bâtiment fut éclairé par une vive lueur, et en même temps la chaîne fut dispersée de toutes parts en fragments brûlants et en globules enflammés gros comme des balles. Ils mirent le feu en cinquante endroits sur le pont, malgré une couche de grêle qui le couvrait et la pluie qui tombait à flots. La tige supérieure elle-même fut fondue sur une longueur de 30 centimètres. D'ailleurs, ce fut le seul dégât qui se produisit.

« Le tonnerre tomba, le 16 juillet 1759, sur une maison du faubourg South-Wark, à Londres. Un cordon de sonnette avait été entièrement fondu et partiellement volatilisé. On voyait, le long du mur contre lequel il était tendu, une trace de parcelles noires qui dessinaient la place qu'il avait occupée, et l'on trouva dans le parquet une traînée de globules arrondis qui s'y étaient incrustés en brûlant les planches autour d'eux. On avait vu,

pendant l'événement, une pluie de feu tomber du cordon sur le plancher.

« La cathédrale de Strasbourg fut, depuis sa construction, à cause de sa grande hauteur, le point de mire sur lequel venaient s'abattre, tous les ans, plusieurs coups de tonnerre, à tel point que, pendant trente ans, la dépense moyenne allouée pour la réparation des dégâts causés par la foudre fut de 3000 fr., et que plusieurs fois l'existence du monument fut menacée. Depuis qu'un paratonnerre y est établi, aucun coup nouveau ne fut observé, et il semblait même que les orages fussent devenus moins fréquents, lorsque, le lundi 10 juillet 1843, un violent orage éclata sur la ville, et la foudre tomba deux fois sur l'extrémité de la tige. Elle était terminée par une pointe de platine qui fut fondue vers l'extrémité, sur une longueur de 5 à 6 millimètres, et le métal s'affaissa d'un côté en coulant comme de la cire ramollie. La goutte se terminait par une surface arrondie très-brillante.

« On entend raconter tous les jours des effets extraordinaires qui montrent avec quelle attention singulière la foudre se dirige vers les parties métalliques et évite les étoffes isolantes.

« Pendant un temps orageux, une dame étend une main pour fermer une fenêtre, la foudre part et le bracelet que porte la dame disparaît si complétement, qu'on n'en trouve plus aucun vestige.

« Une autre fois, suivant Bridone, pendant que madame Douglas regardait par une fenêtre, la foudre frappa le fil de fer qui soutenait le bord de son chapeau, le fondit, brûla le chapeau sans atteindre la dame. »

A ces exemples, on pourrait ajouter de nombreux récits de faits, qui se produisent tous les jours et qui prouvent invariablement la même tendance du tonnerre à choisir, pour les frapper, les conducteurs métalliques. Je ne citerai plus qu'une seule observation, mais elle est concluante.

« En 1759, un détachement qui conduisait du Fort-Royal à Saint-Pierre le capitaine anglais Dibden, prisonnier de guerre à la Martinique, s'arrêta pour se garantir de la pluie au pied du mur d'une petite chapelle. Un violent coup de tonnerre le surprit dans cette position et tua deux soldats; du même coup, la foudre ouvrit dans le mur, derrière les deux victimes, une ouverture

d'environ quatre pieds de haut et de trois pieds de large. Toute vérification faite, il se trouva qu'à la portion du mur démolie, sur laquelle les deux soldats foudroyés s'appuyaient correspondait exactement à l'intérieur de la chapelle un ensemble de barres de fer massives destinées à supporter un tombeau. Ceux qui n'eurent pas le malheur de s'être ainsi placés fortuitement devant des pièces métalliques n'éprouvèrent aucun mal. »

364. J'ai eu l'occasion, il y a peu de temps, d'observer les effets bizarres d'un coup de foudre qui frappa un berger habitant la commune d'Estrées, près Amiens.

Cet homme, ayant été pris dans la campagne par un violent orage, alla s'asseoir sur un tas de fumier, en s'abritant contre la pluie à l'aide d'un parapluie, dont les tiges étaient en baleine et les arcs-boutants en métal. La foudre frappa l'extrémité d'une des baleines, et le fluide, se propageant difficilement à travers ce corps mauvais conducteur, le déchira, suivant sa longueur, en un grand nombre de morceaux, qui représentaient autant de fibrilles partant d'un point commun. La déchirure n'allait que jusqu'au point où la baleine était soutenue par un arc-boutant métallique. Le fluide suivit cet arc-boutant, de là vint frapper l'épaule en se pratiquant une route à travers les vêtements du berger dont la veste, le gilet et la chemise présentaient chacun une déchirure : ces déchirures cruciales se superposaient. Le fluide laboura ensuite l'épaule et la poitrine de la victime, gagna sa chaîne de montre, entra dans la montre d'où il sortit en faisant dans la boîte métallique une ouverture de 2 ou 3 millimètres; les bavures produites par la déchirure brusque du métal étaient en dehors, ce qui prouvait que le fluide avait traversé cette ouverture de dedans en dehors.

Un trou pratiqué dans la poche du gilet et de diamètre à peu près égal à celui que présentait le trou de la montre indiquait le chemin que le fluide avait suivi. Le berger avait les reins ceints d'une chaîne métallique qui retenait son chien : le fluide suivit la chaîne et vint foudroyer l'animal. Quant au berger, il en fut quitte pour de nombreuses brûlures, et pour une paralysie qui avait presque disparu lorsque je l'ai visité huit ou dix jours après l'accident.

365. **Effets de la foudre sur les corps isolants.** — La foudre peut percer des trous dans les matières non conductrices,

les briser en fragments et les disperser au loin ; elle peut les fondre sur les points qu'elle frappe.

« Franklin eut l'occasion d'examiner les effets d'un coup de tonnerre extraordinaire. En 1754, à Newbury, la foudre tomba sur un clocher terminé par une charpente en bois qui avait 21 mètres de hauteur ; cette pyramide fut rasée et dispersée au loin. Mais, en arrivant à la base, la foudre rencontra un fil de fer qui réunissait le marteau d'une cloche aux rouages de la sonnerie située plus bas ; elle le réduisit en fumée et le projeta contre les murs, sous forme d'une traînée noire. Ainsi, dans les parties supérieures, la tour en bois avait été détruite, et un simple fil de la grosseur d'une aiguille à tricoter avait suffi ensuite pour offrir un passage à la foudre et éviter tous dégâts ; mais au-dessous de l'horloge, la communication métallique venant à manquer, la foudre continua sa route dans la maçonnerie et les dégâts recommencèrent.

« Près de Manchester, à Swinton, un petit bâtiment en briques, servant à emmagasiner du charbon de terre et terminé à sa partie supérieure par une citerne, était adossé contre une maison. Les murs avaient 3 pieds d'épaisseur et 11 de hauteur. Le 6 août 1809, à deux heures après midi, une explosion épouvantable se fit entendre ; elle fut immédiatement suivie de torrents de pluie, et pendant quelques minutes une vapeur sulfureuse enveloppa la maison. Le mur extérieur du petit bâtiment fut *arraché* des fondations et *soulevé en masse ;* l'explosion le porta verticalement, *sans le renverser*, à quelque distance de la place qu'il occupait d'abord ; l'une de ses extrémités avait marché de neuf pieds, l'autre de quatre. Le mur, ainsi soulevé et transporté, se composait, sans compter le mortier, de sept mille briques et pouvait peser environ vingt-six tonnes.

« Ce qu'il y a de plus remarquable dans ces actions mécaniques, c'est qu'elles se produisent presque exclusivement aux points de réunion des métaux avec le bois ou la pierre. On trouve dans le récit d'un coup de tonnerre observé à Illes (Pyrénées-Orientales), en 1842, de très-nombreux exemples de ce fait. Le tonnerre tomba dans une maison occupée par un serrurier-mécanicien ; elle était remplie de masses de fer, de rouages de cuivre et d'outils de toute espèce ; elle était, de plus, garnie sur sa façade de balcons, espagnolettes, gonds de fer, etc. C'est à travers

chacune de ces pièces métalliques que la poudre se fit plusieurs passages et, sans aucune exception, elle déchaussa toutes les parties scellées, en projetant des éclats dans tous les sens.

« La foudre tomba, en 1761, sur le clocher de Saint-Brindes à Londres. C'est une flèche en pierres reliées par des crampons; les dernières assises sont massives et traversées par une tige de fer de 6 mètres qui en forme l'axe et qui se termine par une croix. C'est sur cette tige que la foudre arriva d'abord. Elle la suivit jusqu'à sa base, sans laisser aucune trace ni sur le métal, ni sur aucun point de la maçonnerie environnante; mais dès qu'un métal continu lui manqua, les dégâts commencèrent. La grosse pierre qui soutenait l'extrémité inférieure de la barre offrait des éclats et des fentes dirigées dans tous les sens; une très-large ouverture s'était formée du dedans en dehors de la flèche, et la descente se continua par bonds, de crampon en crampon, sans se borner à ceux qui étaient à l'extérieur; la foudre se porta sur tous les morceaux de fer placés dans l'intérieur de la maçonnerie pour unir les pierres entre elles. A tous les scellements, les pierres furent fendues, pulvérisées, lancées au loin; partout ailleurs qu'à ces points de suture, les dégâts étaient nuls ou sans gravité, comme si la foudre ne parvenait à s'échapper par les bouts des pièces métalliques qu'elle a envahies, qu'à l'aide d'un violent effort qui détruit tout aux environs.

« Ce n'est pas à des phénomènes de rupture que se bornent les effets de la foudre sur les corps peu conducteurs. Quand elle les frappe en des points qui ne sont pas dans le voisinage de métaux, elle laisse sur leur surface des traces. C'est ce qui permet d'expliquer certains faits observés depuis longtemps. Saussure dans les Alpes, Ramond au pic du Midi, de Humboldt en Amérique ont trouvé sur les rochers élevés des places vitrifiées où se voyaient des globules fondus; ils ont tous unanimement attribué ces apparences à l'action du tonnerre. C'est encore à la même origine que l'on rapporte la formation des fulgurites; ce sont des tubes vitrifiés qui s'enfoncent verticalement dans le sol. Ils ont été découverts en 1711, en Silésie, par Herman, et on les a retrouvés dans presque toutes les localités, où le sol est couvert d'une couche de sable au-dessous de laquelle il y a de l'eau. On suppose que le tonnerre tombant sur ces sables y fait un trou, et qu'il échauffe les parois du canal qu'il creuse jusqu'au

point de les vitrifier et d'agglutiner entre elles, en les fondant, les portions de sable qui sont autour. Cette explication n'a été pendant longtemps qu'une simple conjecture; mais plusieurs faits sont venus la confirmer: je n'en citerai qu'un, dans lequel la nature a été prise sur le fait.

« Le 17 juillet 1823, le tonnerre tomba sur un bouleau, près du village de Rauschen (le long de la mer Baltique). Les habitants étant accourus virent, auprès de l'arbre, deux trous étroits et profonds; l'un d'eux, malgré la pluie, leur parut, au tact, à une température élevée. M. le professeur Hagen, de Kœnigsberg, fit creuser avec soin autour de ces trous; l'un d'eux, celui qui fut trouvé chaud, n'offrit rien de particulier; le second, jusqu'à une profondeur d'un tiers de mètre, ne présenta non plus rien de remarquable, mais un peu plus bas commençait un tube vitrifié. La fragilité de ce tube ne permit de le retirer que par petits fragments de 4 à 5 centimètres de long. L'enduit vitré intérieur était très-luisant, couleur gris de perle, et parsemé de points noirs dans toute son étendue. »

366. **Des précautions à prendre en temps d'orage.** — Franklin a indiqué les précautions principales qu'il est bon de prendre en temps d'orage, pour se préserver des terribles effets de la foudre.

En temps d'orage, dans les maisons, il faut autant que possible s'éloigner des masses métalliques. Il y a moins de danger à craindre au milieu d'une chambre que contre les murs. Contrairement à une opinion assez répandue, rien ne démontre qu'un courant d'air puisse, comme on le dit, attirer la foudre et qu'il y ait imprudence à laisser les fenêtres ouvertes pendant l'orage.

Au dehors, il est bon de ne pas se placer à proximité des arbres, de ne pas chercher un abri sous leurs branches; car, en vertu de leur élévation, ils sont principalement soumis à l'influence des nuages orageux. On a conseillé, lorsqu'on se trouve pris par un fort orage en rase campagne, de rechercher un grand arbre et de se placer à une distance de son pied égale à peu près à sa hauteur; si ses branches s'étendent en largeur, cette distance devra être plus grande. On comprend que cette précaution puisse avoir son utilité, puisque, si la foudre vient à tomber, elle frappera l'arbre de préférence. Il faut toutefois ajouter qu'il n'y

a là rien d'absolu, et que les arbres ne peuvent pas être considérés comme des préservatifs sûrs.

On cite souvent comme devant préserver des effets de la foudre, les décharges d'artillerie, la sonnerie des cloches, les feux allumés à la surface du sol. Ce sont là autant de précautions qui n'ont pas de raison d'être, et qui, loin de s'appuyer sur des données scientifiques, n'ont d'autre origine que de déraisonnables préjugés. En particulier, l'habitude de sonner les cloches en temps d'orage, loin d'être utile, met souvent en danger la vie du sonneur, qui se trouve en communication directe avec des masses métalliques situées à une certaine hauteur et soumises à l'action décomposante de l'électricité des nuages.

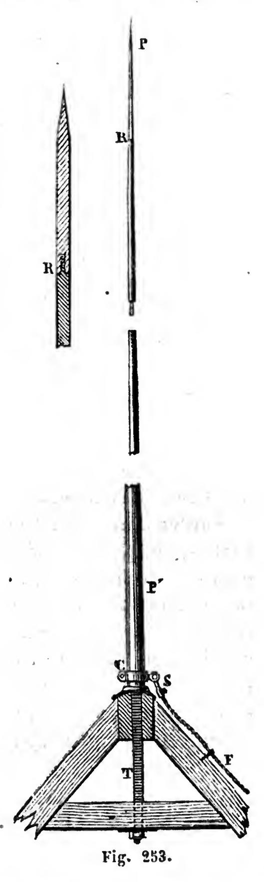


Fig. 253.

367. **Paratonnerres.** — L'invention des paratonnerres est due à Franklin qui, après avoir découvert le pouvoir des pointes, voulut utiliser cette propriété pour décharger les nuages orageux de leur électricité.

Un paratonnerre se compose essentiellement d'une tige pointue placée sur un édifice à protéger et mise en communication avec le sol. Supposons qu'un nuage électrisé positivement, poussé par le vent, vienne à passer au-dessus de l'édifice ; il décomposera le fluide neutre du paratonnerre, repoussera dans le sol le fluide négatif. Mais celui-ci s'écoulant continuellement par la pointe ira neutraliser le fluide positif du nuage qui se trouvera par suite déchargé.

D'après les instructions les plus récentes (1854) de l'Académie

des sciences, un paratonnerre doit se composer d'une tige métallique PP' (fig. 253) ayant de 5 à 20 mètres de longueur, de 5 à 6 centimètres de diamètre à sa base. Sur sa plus grande longueur, cette tige est en fer; elle se continue à sa partie supérieure par un cône en cuivre rouge adapté à vis et soudé en R avec elle. La partie inférieure de cette tige est engagée dans les pièces de la charpente du bâtiment que l'on veut protéger; elle porte, du reste, une embase qui sert à rejeter les eaux pluviales; d'un collier C fixé au bas de la tige part une barre de fer carrée SF de 2 centimètres de côté; qui descend le long du toit et des murs du bâtiment pour se rendre dans le sol. Ce conducteur doit être en communication parfaite avec les pièces métalliques un peu importantes de l'édifice. Il doit aboutir sous terre au milieu de substances conductrices d'une étendue aussi grande que possible. Le rapporteur de l'Académie, M. Pouillet, dit qu'il est indispensable que le conducteur se rende dans une nappe d'eau, puits, etc.; la braise de boulanger souvent employée pour remplir les conduits dans lesquels aboutit le conducteur est insuffisante pour un écoulement régulier de l'électricité. Il est bon, pour augmenter la surface par laquelle l'eau exerce son action conductrice, que le conducteur soit contourné au milieu d'elle en spirale. Nous ajouterons que les angles favorisant l'écoulement de l'électricité, il faut, pour éviter des décharges latérales, se garder d'infléchir trop brusquement le conducteur dans les parties, où, par suite des contours de l'édifice, il change brusquement de direction. Il faut vérifier de temps en temps si la pointe n'est pas émoussée, et s'il n'y a pas de rupture, de solution de continuité dans le conducteur. L'expérience démontre que l'action préservatrice du paratonnerre s'étend horizontalement dans tous les sens à une distance double de la tige. Si un édifice porte plusieurs paratonnerres, on doit réunir tous les conducteurs par des tiges métalliques.

---

# CHAPITRE VII

## MAGNÉTISME

368. **Aimants naturels.** — On appelle *aimants naturels* ou *pierres d'aimant* des minerais de fer qui jouissent de la propriété d'attirer le fer, le nickel, etc. Ce sont des oxydes de fer qui renferment en général 23 pour 100 d'oxygène. Les anciens en trouvaient abondamment près d'une ville d'Asie Mineure appelée Magnésie, et c'est de là que sont venus les noms de vertu *magnétique*, de *magnétisme* et de pierre *magnétique* adoptés d'abord par les Grecs et maintenant consacrés par l'usage.

369. **Aimants artificiels.** — Les aimants naturels n'offrent rien de régulier dans la distribution de la vertu magnétique, tandis qu'au contraire les aimants artificiels présentent certains centres d'attraction. On peut s'en convaincre en roulant un aimant artificiel dans la limaille de fer ; on constate alors que cette dernière ne s'attache pas d'une manière uniforme sur sa surface, qu'elle se porte de préférence autour de certains points (fig. 253 et 254), situés près des extrémités et auxquels on a

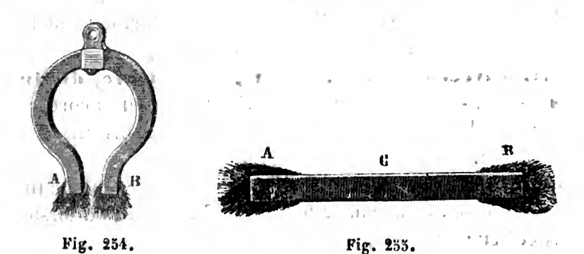



Fig. 254. Fig. 255.

donné le nom de *pôles*. A mesure que l'on s'éloigne de ces points, la vertu magnétique semble diminuer, et l'on arrive vers le milieu de l'aimant à une région qui en est tout à fait dépourvue et que l'on appelle *ligne neutre*.

Ces actions attractives se transmettent à travers tous les corps qui ne sont point magnétiques. Si, par exemple, on place un carton mince sur un aimant, et qu'on y sème de la limaille de fer fine avec un tamis, on la verra se porter principalement vers les extrémités et se distribuer à la surface du carton sous forme de chaînes courbes qui vont d'une extrémité à l'autre, comme on le voit dans la figure 256.

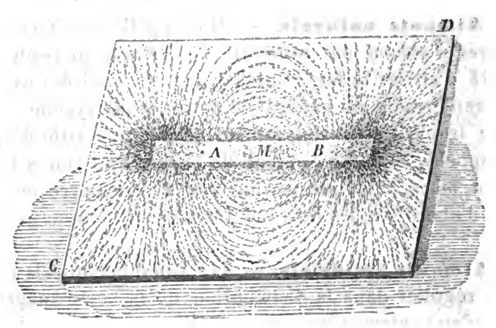



Fig. 256.

370. **Points conséquents.** — Il arrive quelquefois que certains aimants présentent plus de deux pôles, et deux pôles consécutifs sont toujours séparés par une ligne neutre. Ces nouveaux pôles que l'on cherche ordinairement à éviter, dans la fabrication des aimants, sont appelés *points conséquents.*

371. **Direction d'un aimant par la terre, distinction des pôles.** — Jusqu'ici nous n'avions rien vu encore qui établisse une distinction entre les pôles; les faits suivants vont nous y conduire.

Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil, de manière qu'elle puisse tourner dans toutes les directions, ou lorsqu'on la soutient sur un pivot pointu qui s'enfonce dans une cavité creusée en son milieu (fig. 256), on la voit en un même lieu prendre toujours la même direction, l'extrémité A se portant vers le nord, l'extrémité B vers le sud. Si on la dérange de cette position d'équilibre en lui laissant sa liberté de mouvements, elle y revient toujours.

On a cru pendant longtemps que cette direction était exactement la direction nord-sud, celle du méridien géographique, mais on a reconnu plus tard qu'elle en différait un peu. On a appelé *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par l'aiguille suspendue sur un axe vertical : pour fixer ce plan dans l'espace, on a mesuré l'angle que les deux méridiens font entre eux et on l'a appelé *déclinaison*. Cet angle varie d'un lieu à l'autre, et on dit que la déclinaison est *orientale*, quand le pôle qui se dirige vers le nord est dévié du côté de l'est, — *occidentale* dans le cas contraire.

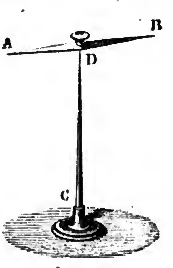


Fig. 257.

L'expérience précédente établit une différence essentielle entre les deux pôles, puisqu'ils se dirigent vers des points opposés. Pour les distinguer, on appelle *pôle nord* le pôle qui se dirige vers le nord, et *pôle sud* celui qui se dirige vers le sud.

372. **Actions réciproques des pôles de deux aimants.** — Prenons maintenant les aimants qui, dans l'expérience précédente, se sont orientés dans l'espace; suspendons l'aimant AB à un fil CD (fig. 258), ou bien sur un pivot vertical comme dans la figure 256; puis approchons de l'extrémité B qui se dirigeait vers le sud le pôle sud *b* d'un autre aimant; immédiatement il y a répulsion, et l'aimant AB se met en mouvement dans le sens indiqué par la flèche courbe : présentons le pôle sud *b* au pôle nord A, et l'aimant mobile sera attiré. On constaterait de même que le pôle sud *a* de l'aimant tenu à la main attire B et repousse A.

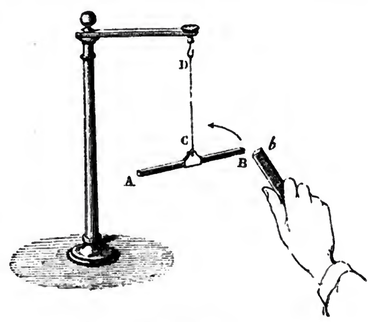


Fig. 258.

Ces faits nous conduisent à la loi suivante : *les pôles de*

*même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.*

373. **Hypothèse de deux fluides magnétiques.** — Nous suivrons ici la même méthode que dans l'étude de l'électricité, et, pour expliquer les faits qui précèdent, nous admettrons l'hypothèse de deux fluides magnétiques, l'un résidant vers le pôle nord de la terre et appelé pour cette raison fluide *boréal*, l'autre résidant vers le pôle sud et appellé fluide *austral*. Nous admettrons que les pôles de même nature dans les aimants contiennent des fluides de même nom, que les fluides de même nom se repoussent et que ceux de nom contraire s'attirent.

Par suite de ces conventions, on est conduit à appeler *pôle austral* le pôle nord d'un aimant, puisque, se dirigeant vers le point de la terre où réside le fluide boréal, il doit contenir du fluide austral, et *pôle boréal* le pôle sud de ce même aimant.

Nous ferons remarquer, comme nous l'avons fait en étudiant l'électricité, que ce qui précède n'est que de pure hypothèse ; mais comme ces hypothèses expliquent tous les faits connus sans que rien vienne les infirmer, il est légitime de les admettre.

374. **Action d'un aimant sur un barreau de fer doux.** — Lorsqu'on présente au pôle B d'un aimant un morceau de fer *aa'* (fig. 259), ce dernier s'aimante ; il se crée en *a* un pôle de nom contraire à B, et en *a'* un pôle de même nom : ce nouvel aimant peut lui même développer l'aimantation dans un second morceau de fer *a'a''*, dans les mêmes conditions, et ainsi de suite.

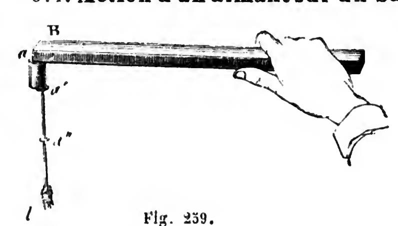


Fig. 259.

375. **Fer doux. — Acier. — Force coercitive.** — Les résultats de l'expérience sont différents, suivant que l'on soumet à l'action d'un aimant un morceau de fer doux (fer pur) ou un morceau d'acier (fer combiné avec du charbon). Dans le cas du fer doux, l'aimantation se produit instantanément, mais elle cesse dès qu'on éloigne l'aimant. Dans le cas de l'acier, l'aimantation se produit plus lentement, mais elle subsiste après l'éloignement de l'aimant.

Pour expliquer ces faits, on suppose que le fer doux et l'acier contiennent les fluides austral et boréal réunis ensemble et que l'approche d'un barreau aimanté déterminant la séparation de ces fluides produit la vertu magnétique. Dans le fer doux, cette séparation se fait facilement parce que rien ne s'oppose à la libre circulation des fluides ; par suite, ils devront se réunir de nouveau dès que l'aimant sera éloigné. Dans l'acier, au contraire, l'aimantation n'est déterminée qu'au bout d'un temps plus long, par suite de l'existence d'une force, appelée *force coercitive*, qui, s'opposant à la libre circulation des fluides, rend leur séparation plus difficile, mais s'oppose aussi après cette séparation à une réunion nouvelle. C'est ce qui fait que l'aimantation subsiste après qu'on a éloigné l'aimant.

376. **Effets de la rupture d'un barreau aimanté.** — Dans l'étude de l'électricité par influence, nous avons admis que les fluides, en se séparant, se portaient chacun à une extrémité des corps électrisés. Le fait suivant ne nous permet pas d'admettre la même chose pour le magnétisme. Si l'on brise en deux une aiguille d'acier aimantée, deux pôles se développent au point de rupture et sont, dans chaque morceau, opposés aux pôles de l'aimant primitif, de sorte que chaque fragment devient lui-meme un véritable aimant.

Nous admettrons que le fluide naturel est réparti d'une manière uniforme sur chaque molécule de l'acier ou du fer, et que, lorsqu'on les soumet à l'action d'un aimant, ce fluide naturel se décompose en deux fluides qui se portent chacun à l'une des extrémités de la molécule ; le fluide austral se portant du côté du pôle austral, le fluide boréal du côté du pôle béréal. On démontre par le raisonnement que cette distribution des fluides conduit au même résultat que si chacun d'eux se trouvait concentré aux centres d'action que nous avons appelés pôles.

## PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

377. On peut développer artificiellement la vertu magnétique dans des barreaux d'acier à l'aide de différents procédés que nous allons décrire.

378. **Simple touche.** — Le procédé de la simple touche est

le plus anciennement connu. Il consiste à frotter un certain nombre de fois, toujours dans le même sens (fig. 260), le barreau à aimanter sur le pôle A d'un aimant : en frottant dans le sens in-

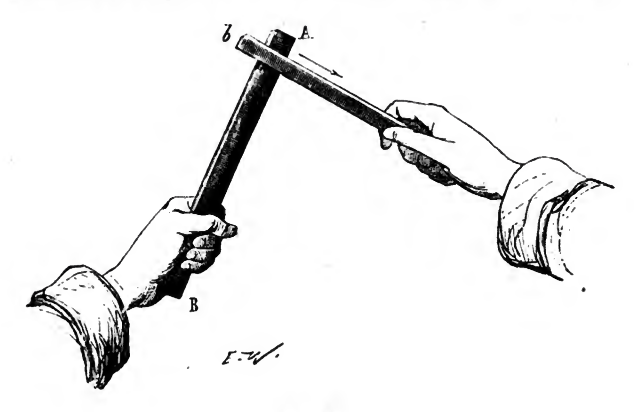



Fig. 260.

diqué par la flèche, il se produira en *b* un pôle de nom contraire à A et à l'extrémité opposée un pôle de même nom que A.

On peut aussi mettre l'une des extrémités de l'aiguille à aimanter en contact avec l'un des pôles d'un aimant et l'y laisser en contact pendant un temps suffisant pour que l'aimantation se développe. L'extrémité en contact avec l'aimant prend un pôle de nom contraire à celui qu'elle touche. Knigth[1], Duhamel[2] et Œpinus apportèrent chacun des perfectionnements importants aux procédés d'aimantation.

379. **Touche séparée.** — Knigth imagina de prendre deux aimants, de les poser sur les barreaux à aimanter, comme l'indique la figure 260, en mettant en regard leurs pôles de nom, contraire A et B, puis il les séparait en les faisant glisser jusqu'aux extrémités opposées du barreau ; il les replaçait ensuite dans la même position, recommençait la même opération, et ainsi de suite.

[1] Knigth, physicien anglais, vivait au siècle dernier.
[2] Duhamel, membre de l'Académie des sciences, vivait au siècle dernier.

Duhamel opérait de la même manière ; il installait solidement sur une table horizontale deux aimants puissants et mettait leurs

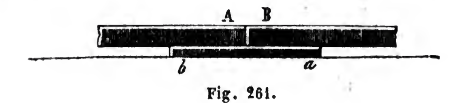



Fig. 261.

pôles austral A et boréal B en regard (fig. 262), mais en les séparant par un morceau de bois *d*; puis il plaçait au-dessus l'aiguille

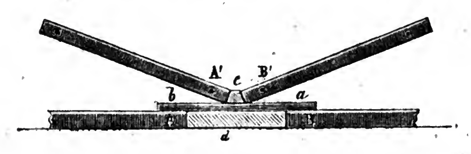



Fig. 262.

à aimanter *ab*, et la frottait comme le faisait Knigth, mais en inclinant les aimants A' et B' de 30° environ sur la barre *ba*. Il se faisait en *a* un pôle austral, en *b* un pôle boréal.

380. **Double touche.**— Œpinus installait la barre à aimanter de la même manière au-dessus de deux aimants A et B. Puis, plaçant au milieu deux aimants inclinés de 20° et dont les pôles contraires A' et B' étaient en regard, semblables chacun aux pôles A et B au-dessus desquels ils se trouvaient, il les transportait, sans les séparer, en allant d'abord de *c* en *b*, puis de *b* en *a*, et ainsi de suite. Il terminait les frictions en allant de *a* vers *c*, de manière à avoir parcouru un nombre égal de fois les deux moitiés de l'aimant.

Ce procédé est le plus efficace.

381. **Faisceaux magnétiques.** — Pour avoir de plus forts

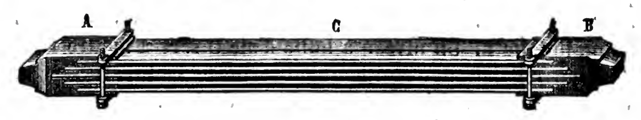



Fig. 263.

aimants, on dispose en faisceaux des barreaux aimantés, dont les

pôles de même nom sont en regard (fig. 263). Souvent on donne à ces faisceaux la forme d'un fer à cheval (fig. 264).

Fig. 264.

Pour conserver aux aimants leur force magnétique, il faut avoir soin de placer contre les pôles des plaques de fer doux appelées *armatures*. On voit en *ab* (fig. 264), cette armature munie d'un crochet. Si à ce crochet on suspend des poids et qu'on en augmente chaque jour le nombre, la force magnétique de l'aimant augmente avec eux.

Les armatures ont pour effet de maintenir la séparation des fluides ; l'absence d'armature amène une déperdition de magnétisme.

Une élévation de température un peu notable détruit aussi la vertu magnétique.

## BOUSSOLES.

382. Nous avons dit (371) que la déclinaison était l'angle formé par le méridien géographique et le méridien magnétique.

On appelle boussole de déclinaison, ou simplement boussole, l'instrument propre à observer la déclinaison quand on connaît par les moyens astronomiques la direction de la méridienne du lieu[1], ou bien à donner cette méridienne et par suite la position des quatre points cardinaux, quand on connaît la valeur de la déclinaison pour le lieu où l'on se trouve.

Un trépied à vis calantes supporte un limbe divisé CC′ (fig. 264) sur lequel peut se mouvoir, autour de l'axe central de l'appareil, une boîte A renfermant une aiguille aimantée horizontale et capable de se mouvoir sur le cercle divisé HH. Cette boîte porte deux montants verticaux B B′, qui supportent l'axe de rotation d'une lunette L. Un niveau à bulle d'air O sert à mettre l'axe de l'appareil dans une position bien verticale. La lunette servira à déterminer le méridien géographique du lieu.

[1] On appelle méridienne d'un lieu l'intersection du méridien géographique avec l'horizon ; cette ligne est dirigée du nord au sud.

Nous ne décrirons pas le procédé employé pour déterminer la déclinaison à l'aide de cet appareil.

383. **Boussole marine.** — La boussole dont se servent les marins est disposée de manière que l'aiguille reste toujours horizontale malgré le mouvement du vaisseau.

Elle se compose d'une boîte suspendue à la Cardan (fig. 265) et dont le fond supporte le pivot sur lequel tourne l'aiguille qui est collée sur un disque de substance transparente portant à sa

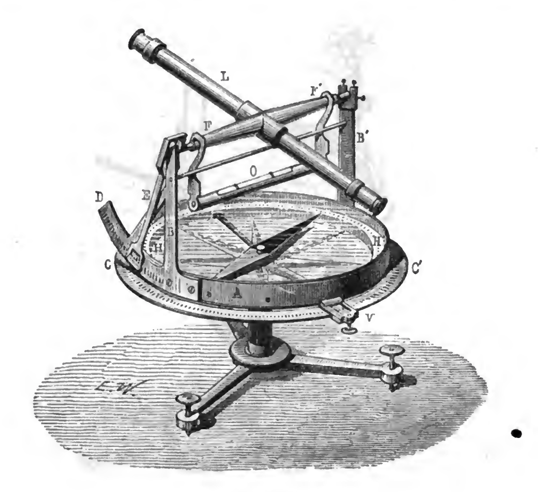



Fig. 265.

circonférence une division en degrés. La boussole est ordinairement accompagnée d'un système de pinnules que l'on voit en F sur le bord de la boîte, et qui servent à déterminer le méridien géographique du lieu.

Une ligne fixe, appelée *ligne de foi*, est tracée sur le fond de la boîte et placée dans la direction de la quille du navire. On peut alors connaître, à chaque instant, l'angle que fait l'aiguille avec la ligne de foi, c'est-à-dire avec la quille du bâtiment ; et, si l'on connaît la déclinaison du lieu, on peut, en l'ajoutant à l'angle observé ou en l'en retranchant, suivant les cas, con-

naître la direction que suit le navire par rapport aux points cardinaux.

« La propriété directrice de l'aimant, dit Biot, est une des plus belles découvertes que les hommes aient jamais faites ; elle a donné aux navigateurs un moyen sûr de reconnaître la direction de leur route à travers l'immensité des mers, au milieu des nuits obscures, et lorsque les brumes ou les tempêtes leur dérobent

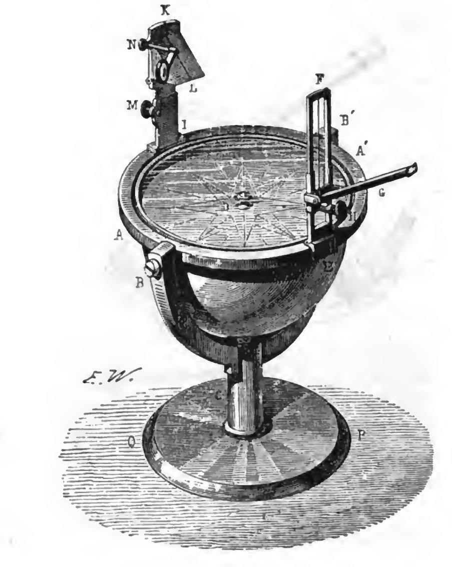



Fig. 266.

entièrement la vue des cieux. Une aiguille aimantée, suspendue en équilibre sur un pivot, leur montre le nord et le sud aussi bien que l'observation des astres. Cette invention, si utile et si simple, ne remonte guère qu'au douzième siècle. Jusqu'alors les navigateurs ne pouvaient se hasarder à s'éloigner des côtes. La découverte de la boussole leur a donné le moyen de s'élancer dans la haute mer et d'aller chercher des terres nouvelles, ignorées des plus puissantes nations de l'antiquité. »

384. La déclinaison varie non-seulement d'un lieu à l'autre, mais dans un même lieu. Ainsi, la déclinaison qui à Paris, en 1580, était de 30° orientale, est aujourd'hui de 20° environ occidentale.

385. On appelle *inclinaison* l'angle que fait avec l'horizon la moitié australe d'une aiguille aimantée se mouvant autour d'un axe horizontal et dans le méridien magnétique. Cet angle varie suivant la position du plan dans lequel se meut l'aiguille; il est minimum lorsque ce plan concorde avec le méridien magnétique, maximum et de 90° quand il lui est perpendiculaire.

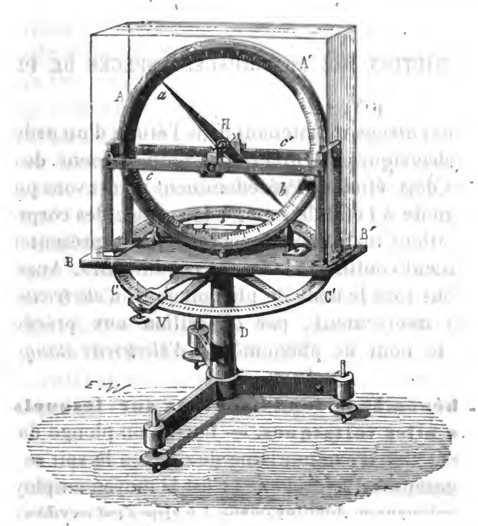


Fig. 267.

L'inclinaison se détermine avec la boussole d'inclinaison que représente la figure 266.

A Paris, l'inclinaison est de 50°; elle est soumise aussi à des variations.

# ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE OU VOLTAIQUE

## CHAPITRE VIII

### DESCRIPTION DES PRINCIPALES ESPÈCES DE PILES.

386. Nous entrons maintenant dans l'étude d'un ordre de phénomènes électriques qui diffèrent essentiellement de ceux que nous avons déjà étudiés. Précédemment nous avons pu considérer l'électricité à l'état de repos à la surface des corps ; les faits que nous allons maintenant exposer nous la présentent à l'état de mouvement continu le long des conducteurs. Aussi les désignerons-nous sous le nom de phénomènes d'*électricité dynamique* (ou en mouvement), par opposition aux précédents qui ont reçu le nom de phénomènes d'*électricité statique* (ou en repos).

387. **Phénomènes fondamentaux sur lesquels repose le jeu des piles voltaïques.** — Lorsqu'on plonge dans l'acide sulfurique étendu d'eau une lame de zinc, on la voit se recouvrir de bulles gazeuses d'hydrogène ; c'est le moyen employé en chimie pour préparer ce dernier corps. Le zinc s'est oxydé aux dépens de l'oxygène de l'eau, et l'oxyde de zinc produit s'est combiné avec l'acide sulfurique pour former du sulfate d'oxyde de zinc ; quant à l'hydrogène abandonné par l'oxygène, il s'est dégagé sous forme de gaz. Si, pendant que cette réaction chimique s'effectue entre les corps mis en présence, on met la lame de zinc en communication avec un électroscope de nature spéciale et d'une grande sensibilité, on constate que le métal s'est chargé d'électricité négative. Cette production de fluide négatif doit nous faire supposer que le fluide neutre dont il provient a donné lieu par sa décomposition à une quantité égale de fluide positif ; c'est ce que nous pouvons en effet constater. Il suffit, pour cela, de plonger dans la dissolution acide une lame de platine et de la relier aussi à l'électroscope. Le platine, non attaquable par l'acide étendu d'eau,

recueillera l'électricité positive qui s'est développée dans le liquide et la conduira sur l'électroscope où l'on pourra manifester sa présence.

Si, de même, on réunit par une mèche d'amiante deux vases contenant, l'un un acide[1], l'autre la solution d'une base, les deux liquides montant dans la mèche s'y rencontreront, se combineront pour former un sel et donneront naissance à une certaine quantité d'électricité négative dans le vase contenant la base, à une quantité égale d'électricité positive dans le vase contenant l'acide. C'est ce que l'on constate en mettant chacun des vases alternativement en communication avec l'électroscope.

388. Nous admettrons qu'en général, lorsqu'il y a action chimique entre deux corps en contact, il y a production d'électricité positive sur l'un des deux corps, d'électricité négative sur l'autre. S'il n'y a pas d'action chimique au contact, on ne constate aucun dégagement d'électricité.

389. En particulier, lorsqu'un acide attaque un métal, le métal se charge d'électricité négative, l'acide d'électricité positive.

390. Lorsque deux métaux sont en contact avec un acide, que l'un des deux est attaqué, que l'autre l'est peu ou moins que le premier, le métal attaqué se charge d'électricité négative, le métal non attaqué se charge de l'électricité positive qu'il prend à l'acide.

C'est sur ces principes que repose la théorie de la production de l'électricité dans les instruments désignés en physique sous le nom de *piles voltaïques*.

391. **Pile de Volta ou pile à colonne.** — Plaçons sur un corps isolant, comme une lame de verre par exemple, un disque de zinc, au-dessus de ce disque une rondelle de drap mouillé d'eau acidulée par l'acide sulfurique, au-dessus de la rondelle un disque de cuivre, nous aurons ce qu'on appelle un élément ou couple voltaïque. D'après les principes exposés plus haut (387), le zinc se chargera d'électricité négative, le cuivre d'électricité positive qu'il recevra de la rondelle mouillée d'acide sulfurique. Si

[1] On appelle *acide*, en chimie, tout corps rougissant la teinture bleue de tournesol.

On appelle *base* tout corps ramenant au bleu la teinture de tournesol rougie par un acide.

Un *sel* est le résultat de la combinaison d'un acide et d'une base.

à cet élément on en superpose un autre, et, dans le même ordre, à cet autre un troisième, et ainsi de suite, on construit la pile de Volta [1] (fig. 268).

Cette superposition se fait ordinairement entre trois colonnes de verre qui maintiennent les disques en équilibre. L'expérience prouve que, lorsque la pile est isolée comme nous l'avons supposé, la moitié inférieure, qui se termine par un disque de zinc, se charge d'électricité négative, dont la tension diminue en allant de l'extrémité au milieu, qui se trouve à l'état neutre; que la moitié supérieure, terminée par un disque de cuivre, est chargée d'électricité positive dont la tension diminue aussi, à mesure qu'on s'éloigne de l'extrémité. La quantité d'électricité développée et sa tension augmentent avec le nombre de couples superposés. Les deux extrémités de la pile sont appelées *pôles* : l'extrémité zinc, où est accumulé le fluide négatif, est désignée sous le nom de *pôle négatif*; l'extrémité cuivre, où s'accumule le fluide positif, sous le nom de *pôle positif*.

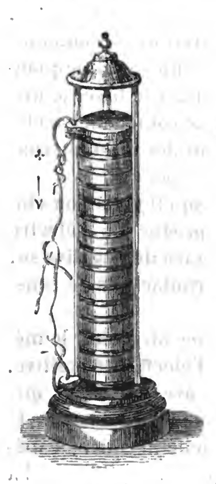


Fig 268.

392. Lorsque la pile, au lieu d'être isolée, se trouve en communication avec le sol par son pôle positif, l'instrument se charge sur toute sa longueur de fluide négatif; dans le cas où c'est le pôle négatif qui communique avec la terre, la pile reste chargée de fluide positif.

393. Si l'on réunit les deux pôles de la pile par deux fils conducteurs, les deux électricités accumulées aux pôles se précipitent à travers le fil à la rencontre l'une de l'autre pour se recombiner et former du fluide neutre; mais aussitôt, l'action chimique, source permanente de fluides électriques, charge à nouveau l'appareil, si bien qu'à chaque instant de nouvelles quantités d'électricité se recombinent à travers le fil conducteur, et sont remplacées dans la pile par de nouvelles doses de fluides

[1] Volta (Alexandre), physicien célèbre, professeur de physique à Pavie, né à Côme en 1745, mort en 1826.

développés sous l'influence de l'action chimique. On a alors, tant que dure cette action, un double mouvement d'électricité positive et négative; cette recomposition du fluide est mise en évidence: 1° par la secousse que l'on reçoit lorsqu'on touche avec les mains les deux extrémités de la pile, le corps devenant alors le conducteur à travers lequel les fluides opposés se combinent; 2° par les étincelles qui se produisent lorsque l'on rapproche les extrémités des fils fixés aux pôles, ou mieux lorsque, après les avoir réunies, on les sépare.

394. **Courant.**—Pour simplifier, on a l'habitude en physique de ne considérer que le mouvement de l'un des fluides, et l'on appelle *courant électrique* le mouvement du fluide positif allant dans le circuit extérieur du pôle positif au pôle négatif, dans l'intérieur de la pile du pôle négatif au pôle positif.

Les deux fils sont désignés sous le nom de *rhéophores* ou *électrodes*.

395. Volta, dominé par l'idée que le développement de l'électricité se faisait au contact des deux métaux, montait sa pile d'une manière un peu différente de celle que nous avons décrite. Pour s'assurer du contact qui, selon lui, était la cause du phénomène, il soudait ensemble les disques cuivre et zinc et les disposait comme il suit: disque cuivre et zinc, rondelle de drap mouillé, disque cuivre et zinc, rondelle, et ainsi de suite; et alors le fluide négatif qui, d'après ce que nous avons dit, se développe par l'action chimique sur le zinc, passait directement, dans le dernier couple inférieur, sur le cuivre qui, pour Volta, devait alors être le pôle négatif, de même que le zinc qui terminait la pile à sa partie supérieure devait en être le pôle positif. Les développements que nous avons donnés montrent que cette interprétation était erronée et que, dans la disposition adoptée par Volta, le dernier cuivre et le dernier zinc ne jouent aucun rôle dans la marche de l'appareil et qu'ils ne font que recevoir, l'un le fluide négatif qui lui vient du zinc auquel il est soudé, l'autre le fluide positif qui lui vient du cuivre auquel il est soudé.

396. **Détermination des pôles.** — En général, dans l'étude des piles dont nous donnerons la description, nous regarderons comme représentant le pôle négatif le métal le plus attaqué, chimiquement parlant.

397. **Inconvénients de la pile de Volta.** — La pile de Volta

présente plusieurs inconvénients graves. D'abord elle est longue à monter lorsqu'elle présente un nombre de couples assez considérable. De plus, les disques métalliques pesant sur les rondelles de drap expriment, par la pression qu'ils exercent sur elles, une partie du liquide acidulé, ce qui diminue l'intensité de l'action chimique et la conductibilité intérieure de l'instrument. Le liquide ruisselant sur la surface extérieure de la colonne établit d'ailleurs une communication entre les différents couples et par suite la quantité d'électricité qui se rend au pôle est diminuée. Pour ces motifs, l'intensité du courant fourni par cette pile décroît rapidement et au bout de peu de temps devient presque nulle.

398. **Pile à auges.** — La pile à auges, inventée par Cruiksank[1], n'est autre que la pile à colonne de Volta couchée horizontalement et échappant par là même aux inconvénients résultant de la superposition des disques. Elle est formée d'une caisse rectangulaire en bois (fig. 268), mastiquée à l'intérieur et partagée

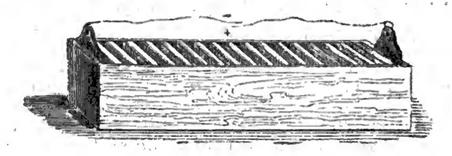


Fig. 269.

en auges étroites par des cloisons métalliques formées chacune par une lame de zinc soudée à une lame de cuivre. Ces cloisons sont disposées dans le même ordre de manière que la paroi gauche de chacune d'elles soit formée par une lame de zinc, par exemple, et la paroi droite par une lame de cuivre.

On verse, dans chaque auge, de l'eau acidulée par l'acide sulfurique : le liquide doit remplir l'auge, mais ne doit pas déborder par-dessus les cloisons. Dans l'auge extrême de droite plonge une lame de zinc qui représente le pôle négatif; dans l'auge extrême de gauche plonge une lame de cuivre qui, recueillant le fluide positif qui arrive dans le liquide de cette auge, représente alors le pôle positif de la pile.

[1] Cruiksank, physicien, né à Édimbourg en 1746, mort à Londres en 1802.

C'est avec une pile de cette nature et comprenant deux mille couples que fut faite, en 1806, par Davy[1], à l'Institut royal de Londres, la décomposition de la potasse en oxygène et en un métal inconnu jusqu'alors, le potassium.

399. **Pile de Wollaston.** — Dans la pile à colonne et dans la pile à auges, on n'utilise pour l'action chimique que l'une des faces de la lame de zinc, et, pour recueillir l'électricité positive de l'acide, que l'une des faces de la lame de cuivre.

Pour remédier à cet inconvénient et augmenter l'intensité des effets produits, Wollaston[2] a imaginé la disposition suivante. Une lame rectangulaire *zz* (fig. 270), de 6 à 7 millimètres d'épaisseur, est soudée sur un ruban de cuivre *c'* courbé deux fois à angle droit et se terminant en forme de lame recourbée *c'c'* qui a une largeur égale à celle de la lame de zinc *z'z'* de l'élément suivant et qui l'enveloppe sans la toucher. La lame de zinc *z'z'* est soudée à un autre ruban de cuivre *c''* et ainsi de suite ; tous les rubans de cuivre sont fixés à une traverse en bois (fig. 271) soutenue par deux montants verticaux. Des bocaux en

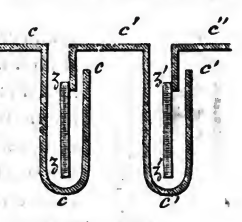


Fig. 270.

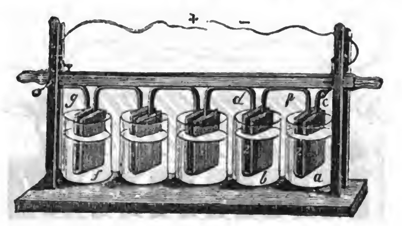


Fig. 271.

verre contenant de l'eau acidulée d'un dixième d'acide sulfurique et d'un vingtième d'acide azotique sont disposés en ligne et peuvent recevoir les éléments. La traverse en bois qui soutient les couples peut être fixée à des hauteurs différentes le long des

[1] Davy (sir Humphry), chimiste anglais, né à Penzance en 1778, mort à Genève en 1829.

[2] Wollaston, physicien anglais, né en 1766, mort en 1828.

montants, de manière que l'on puisse facilement suspendre l'action de la pile en sortant les éléments des bocaux. A l'extrémité droite de la pile, la dernière lame de zinc formant pôle négatif est soudée à un ruban de cuivre C qui représente l'électrode négative ; à l'extrémité gauche, la lame de cuivre formant pôle positif est soudée à un autre ruban de cuivre *g* qui représente l'électrode positive.

400. **Pile de Munch.** — La pile de Wollaston a l'avantage de produire des effets plus intenses que les précédentes, mais elle présente l'inconvénient de ne contenir sur un grand espace qu'un nombre restreint d'éléments. Munch a adopté la disposition suivante, qui permet d'en réunir un nombre plus grand sous le même volume. Un premier système d'éléments, composés chacun (fig. 272) d'une lame de cuivre *cc* et d'une lame de zinc *zz* soudées entre elles en forme d'U, s'enchevêtre dans un second système d'éléments identiques *c'c'*, *z'z'*, de manière que chaque lame de zinc soit entre deux lames de cuivre et chaque lame de cuivre entre deux lames de zinc. Le tout est monté dans un cadre en bois et peut être plongé dans une auge mastiquée remplie d'eau acidu-

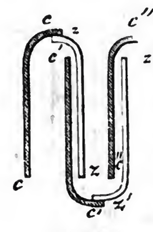


Fig. 272.

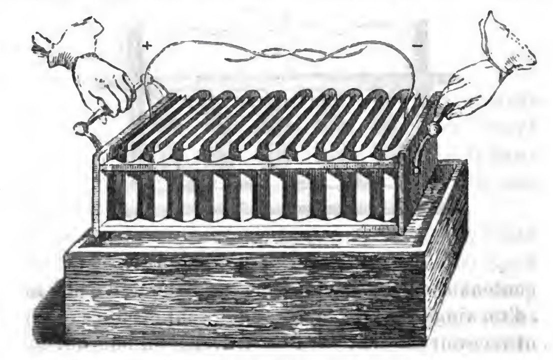


Fig. 273.

lée (fig. 273). La dernière lame de cuivre libre forme le pôle positif, la dernière lame de zinc le pôle négatif.

401. **Piles à deux liquides.** — Toutes les piles que nous venons de décrire offrent un caractère commun : il n'entre qu'un seul liquide dans leur constitution. Mais elles présentent un défaut qui leur est commun aussi, celui de produire un courant dont l'intensité, énergique au début, s'affaiblit rapidement par suite de diverses causes que nous n'examinerons pas. Les piles de Daniell et de Bunsen, qui renferment chacune deux liquides, échappent, la première surtout, à ce reproche.

402. **Pile de Daniell.** — L'élément de Daniell présente la disposition suivante : un premier vase A (fig. 274) renferme une dissolution saturée de sulfate de cuivre ou couperose bleue, au milieu de laquelle plonge une lame cylindrique B de cuivre percée de trous ; dans l'intérieur de cette lame se trouve, plongeant aussi dans le sulfate de cuivre, un vase poreux D en terre de pipe dégourdie. Ce vase contient de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique ou bien une dissolution de sel marin.

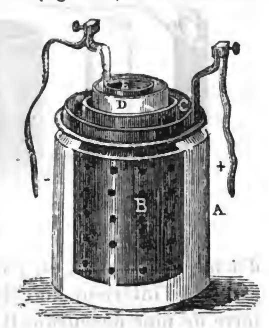


Fig. 274.

Enfin dans le vase D on place un cylindre creux de zinc amalgamé [1]. Le zinc est le pôle négatif de cet élément, le cuivre le pôle positif. Pour former la pile, on peut réunir le zinc du premier élément au cuivre du second, le zinc du second, au cuivre du troisième, et ainsi de suite. La lame de cuivre restant libre dans le premier élément forme le pôle positif, la lame de zinc restant libre dans le dernier forme le pôle négatif.

Par suite des réactions chimiques qui se produisent dans chaque élément, la dissolution de sulfate de cuivre s'appauvrit rapidement, et cet appauvrissement diminuerait bientôt l'intensité du courant. Aussi, pour éviter cet inconvénient, le cylindre B est surmonté d'une petite galerie métallique C à fond percé de

[1] Le zinc amalgamé est simplement du zinc que l'on a frotté avec du mercure de manière à allier le zinc au mercure à la surface. Le zinc amalgamé a l'avantage de n'être attaqué par l'eau acidulée que lorsque le circuit de la pile est fermé, ce qui constitue une économie notable. On remarque de plus que le courant est plus intense que lorsqu'on emploie du zinc ordinaire.

trous, dans laquelle on place des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent lentement dans le liquide du vase A et le maintiennent à l'état de saturation.

C'est une modification de cette pile, imaginée par M. Bréguet, qu'emploie l'administration des lignes télégraphiques.

403. **Pile de Bunsen ou pile à charbon.** — La figure 275 représente un élément de la pile de Bunsen monté et démonté. Un vase V en faïence contient de l'eau acidulée avec un dixième

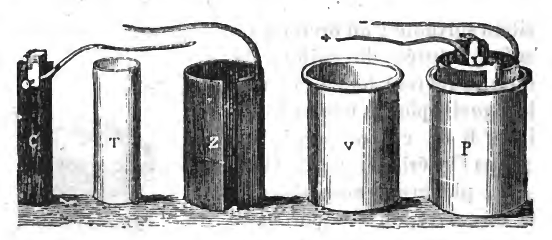



Fig. 275.

d'acide sulfurique ; on y introduit le cylindre Z de zinc amalgamé. A l'intérieur du cylindre Z se place un vase poreux T en terre de pipe dégourdie. Il renferme de l'acide azotique au milieu duquel plonge un parallélipipède C de charbon de cornue [1].

On forme la pile comme nous l'avons indiqué pour la pile de Daniell. Le zinc est le pôle négatif, le charbon le pôle positif. La pile de Bunsen est maintenant la plus employée ; elle produit des courants plus intenses que celle de Daniell, mais leur intensité est plus variable. Elle est facile à construire et peu coûteuse. Son principal inconvénient est de fournir des vapeurs.

## EFFETS DE LA PILE.

404. Nous diviserons les effets de la pile en effets physiologiques, en effets physiques dans lesquels nous comprendrons les effets calorifiques et lumineux, enfin en effets chimiques.

[1] On nomme charbon de cornue une espèce de coke qui se forme contre les parois des cornues où l'on prépare le gaz de l'éclairage par la distillation de la houille. Il est très-dense et bon conducteur de l'électricité.

## EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

405. Si l'on vient à toucher avec les mains les deux pôles d'une pile de Volta, on ressent une commotion semblable à celle que produirait une bouteille de Leyde faiblement chargée. A la commotion produite au moment où l'on établit le contact succède une espèce de fourmillement dans les doigts, qui est lui-même remplacé par une nouvelle commotion lorsqu'on vient à rompre la communication entre les deux pôles. Ces effets sont dus à la recomposition à travers le corps des fluides qui se trouvent aux pôles de la pile. L'intensité des effets dépend du nombre des éléments et non de leur surface.

Gay-Lussac, ayant voulu éprouver le choc de six cents couples d'une batterie à auges, reçut une commotion tellement violente qu'il s'en ressentit pendant plus de vingt-quatre heures, et conserva pendant tout ce temps une grande faiblesse dans les bras. La pile de deux mille couples de l'Institut royal de Londres peut tuer un cheval ou un bœuf.

Une pile Bunsen de cinquante éléments donne une commotion très-forte, désagréable, mais qui n'a rien de dangereux.

La médecine tire chaque jour parti des effets physiologiques produits par la pile pour ramener la mobilité ou la sensibilité dans un organe frappé de paralysie incomplète. On se sert dans ce cas d'appareils spéciaux que nous ne décrirons pas et qui permettent de régler le nombre et l'intensité des décharges successives auxquelles on soumet la partie malade.

406. On peut aussi produire, à l'aide des courants électriques, des effets très-intéressants sur le corps des animaux morts.

La première expérience à citer est celle que fit Galvani[1] avec des membres de grenouilles, et qui donna lieu à la découverte de la pile. Galvani, ayant séparé le train de derrière d'une grenouille, la dépouilla de sa peau et planta un crochet métallique entre les nerfs lombaires et l'extrémité de la colonne vertébrale. Le crochet fut attaché à la balustrade d'un balcon de fer, et le vent, en agitant l'animal, ayant amené les muscles en contact avec les barres verticales de ce balcon, Galvani constata avec étonnement qu'à

[1] Galvani, médecin et physicien, né à Bologne en 1737, mort en 1793.

chaque contact une convulsion agitait les membres de la grenouille. Cette expérience fut bientôt répétée par tout le monde savant; des interprétations différentes se produisirent, une lutte s'engagea entre Galvani et Volta. Sans en suivre les détails, nous admettrons qu'au contact du zinc et de la grenouille, une action chimique se développe et produit des fluides qui, se recombinant à travers les membres de l'animal, les font se contracter. On peut refaire l'expérience de Galvani en touchant les pattes et les nerfs lombaires avec un arc métallique articulé dont l'une des branches C est en cuivre et l'autre Z en zinc (fig. 276).

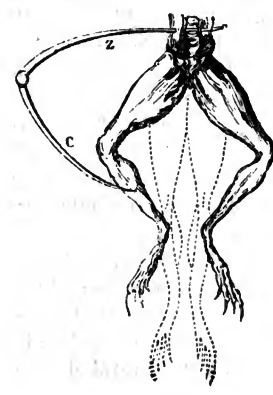



Fig. 276.

407. Aldini soumit à l'action d'une pile de cent éléments la tête d'un bœuf récemment tué; ayant fait communiquer l'un des pôles avec l'intérieur d'une oreille mouillée d'eau salée, l'autre pôle avec l'autre oreille, il put faire tourner les yeux dans leur orbite, enfler les naseaux, mouvoir la langue et les oreilles. De Humboldt [1], ayant fait passer le courant de la pile à travers le corps de poissons auxquels il avait coupé la tête, les a vus sauter et donner des coups de queue. Avec une pile de cinquante éléments Bunsen, ces expériences réussissent parfaitement sur des lapins récemment tués; on parvient à produire les contractions du cœur, les mouvements des poumons et du diaphragme. L'expérience peut réussir une heure encore après la mort de l'animal.

## EFFETS PHYSIQUES.

408. **Effets calorifiques.** — Aussitôt après la découverte de la pile de Volta, on chercha si la décharge de ses pôles pouvait, comme la décharge des batteries électriques, produire des phénomènes calorifiques, faire fondre, par exemple, des fils métalli-

[1] De Humboldt, illustre naturaliste allemand, né à Berlin en 1769, mort en 1860.

ques. En juin 1801, Thénard [1] et Hachette [2], ayant fait communiquer les pôles d'une pile à l'aide d'un fil métallique, le virent s'échauffer, rougir, fondre ou se volatiliser, suivant que ce fil était plus fin et plus court. On peut, à l'aide d'un seul élément Wollaston, produire les mêmes effets sur un fil de fer de 2 ou 3 centimètres de longueur et d'un très-petit diamètre.

Avec une pile de Wollaston de douze éléments, on fait rougir sur toute son étendue un fil de fer de 25 centimètres de longueur et d'un demi-millimètre de diamètre. L'expérience réussit d'autant mieux que le métal qui sert de conducteur interpolaire est moins conducteur de l'électricité. L'argent est douze fois plus conducteur que le platine. Aussi, si l'on fait une chaîne composée de bouts de fils de platine et d'argent égaux en longueur et en diamètre, qu'on se serve de cette chaîne pour unir les deux pôles d'une pile, on verra les chaînons de platine rougir, ceux d'argent s'échauffant à peine.

Une pile de Bunsen de cinquante éléments suffit à faire fondre des tiges de platine de 2 millimètres de diamètre ; elles se résolvent en gouttelettes d'un grand éclat. L'expérience est aussi très-brillante avec des aiguilles à tricoter de la même grosseur ; le métal projette en tous sens des particules incandescentes qui brûlent dans l'air.

Le cuivre brûle en donnant une flamme verte ; le zinc produit une flamme blanche d'un aspect livide, et l'on voit s'élever dans l'air, autour du métal en fusion, des flocons neigeux d'oxyde de zinc.

L'intensité des effets calorifiques dépend plutôt de la surface des éléments que de leur nombre.

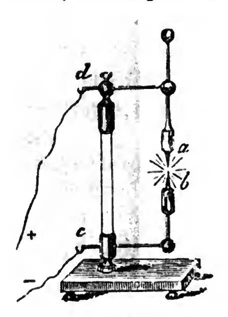


Fig. 277.

409. **Effets lumineux.** — Lorsqu'on rapproche l'une de l'autre les extrémités des conducteurs qui communiquent avec les pôles d'une pile assez énergique, on remarque qu'il faut les amener à se toucher pour qu'il jaillisse des étincelles ; mais si, après le contact, on les éloigne graduel-

[1] Thénard (Louis-Jacques), célèbre chimiste français, membre de l'Académie des sciences, né à Louptière (Aube) en 1777, mort à Paris en 1857.

[2] Hachette, savant géomètre, né à Mézières en 1765, mort en 1834.

lement, on voit des étincelles jaillir entre les deux conducteurs et d'une manière continue.

L'arc lumineux qui unit alors les conducteurs a été étudié par Davy et désigné par lui sous le nom d'arc voltaïque. On peut reproduire ses expériences de la manière suivante. Les pôles d'une pile de cinquante éléments Bunsen sont mis en communication par des fils de cuivre recouverts de gutta-percha

Fig. 278.

avec les montures métalliques *c* et *d* de l'appareil représenté par la figure 277. Les montures sont isolées l'une et l'autre par une colonne de verre ; elles sont traversées par des tiges métalliques horizontales dans lesquelles se fixent des tiges métalli-

ques verticales, dont les extrémités *a* et *b* reçoivent une baguette de charbon de cornue. La tige verticale supérieure peut être déplacée de manière que l'on puisse approcher suffisamment l'une de l'autre les deux baguettes de charbon. Lorsque la distance qui les sépare est convenable, on voit jaillir entre *a* et *b* un arc lumineux dont l'œil a peine à supporter l'éclat. Mais il se fait bientôt un transport de particules de charbon positif *a* vers le pôle négatif *b*; la pointe du charbon positif s'émousse (fig. 277); son extrémité se creuse et, la distance entre les deux pôles devenant trop considérable, l'arc lumineux s'éteint bientôt. MM. Foucault et Duboscq ont inventé des appareils régulateurs de la lumière électrique, qui ont pour effet de maintenir les charbons à une distance à peu près constante. On obtient alors une lumière d'une intensité très-grande et d'une fixité suffisante. Ces appareils ont déjà rendu de grands services dans les travaux que l'on ne voulait pas interrompre pendant la nuit, par exemple, dans la construction des docks Napoléon, à Paris, du nouveau canal Saint-Martin, du pont Saint-Michel, dans les travaux de la rue de Rivoli. Ils sont aussi appliqués à l'éclairage des phares élevés sur les côtes.

410. **Température de l'arc voltaïque.** — La température de l'arc voltaïque est excessivement élevée: Despretz a pu y fondre et volatiliser les substances les plus réfractaires, le charbon, le bore, le silicium, le platine, etc.

## EFFETS CHIMIQUES.

411. Les effets chimiques de la pile consistent dans la décomposition que le courant électrique peut faire subir aux corps composés de plusieurs éléments. La découverte de ces effets a donné naissance à d'importantes industries dont le développement va croissant de jour en jour, la galvanoplastie, la dorure et l'argenture des métaux.

L'intensité des effets chimiques de la pile dépend du nombre des éléments plutôt que de leur surface.

412. **Composés binaires.** — La loi qui régit la décomposition de ces corps est la suivante :

*Lorsqu'on soumet à l'action d'un courant suffisamment énergi-*

*que un composé binaire* [1], *les deux éléments se séparent; l'un se rend au pôle négatif, l'autre au pôle positif.*

413. **Décomposition de l'eau.** — La première expérience de décomposition électro-chimique a été faite en 1800 par Carlisle et Nicholson, qui décomposèrent l'eau en oxygène et en hydrogène. Voici comment on dispose aujourd'hui l'expérience. La figure 279 représente un verre dont le fond est traversé par deux lames de platine *o* et *h*, pouvant être mises en communication, l'une *o* avec le pôle positif d'une pile de quatre éléments Bunsen, l'autre *h* avec le pôle négatif. Ce verre contient de l'eau que l'on a légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique pour augmenter sa conductibilité. Au-dessus des lames de platine sont placées des éprouvettes O et H que l'on a remplies d'eau. Le courant arrive dans le vase par la lame *o*, traverse le liquide et se rend à la lame *h*, d'où il retourne à la pile. Le passage du courant produit la décomposition du liquide; aussitôt que la communication avec les pôles est établie, on voit les lames de platine se recouvrir de bulles gazeuses qui montent bientôt à travers le liquide des éprouvettes. Le gaz recueilli dans l'éprouvette H, l'*hydrogène*, a un volume double de celui qui se trouve dans l'éprouvette O, l'*oxygène*. — Cette expérience conduit à admettre que l'eau se compose de deux volumes d'hydrogène combinés avec un volume d'oxygène.

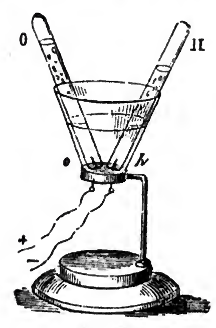


Fig. 279.

L'appareil que nous venons de décrire a été désigné par les physiciens sous le nom de *voltamètre*, parce qu'il peut servir à mesurer l'intensité relative des courants.

414. **Décomposition des oxydes métalliques** [2]. — En 1806, Davy, soumettant à l'action d'une pile énergique la potasse, que l'on considérait avant lui comme un corps simple, découvrit qu'elle pouvait sous l'influence du courant se décomposer en deux éléments : un métal, le potassium, qui se rendait au pôle négatif; un gaz, l'oxygène, qui se réndait au pôle positif.

[1] On appelle composé binaire un corps formé par la combinaison de deux corps simples.
[2] On appelle oxyde métallique le résultat de la combinaison d'un métal avec l'oxygène.

L'expérience répétée plus tard sur d'autres oxydes métalliques a conduit à des résultats identiques : *le métal se rend toujours au pôle négatif et l'oxygène au pôle positif.*

415. **Décomposition des composés binaires métalliques.** — Si, au lieu de soumettre à l'action décomposante de la pile les combinaisons des métaux avec l'oxygène, on opère sur les composés que ces corps peuvent former avec d'autres éléments, comme le chlore, le soufre, etc., les résultats offrent une grande analogie avec les précédents; le métal va encore au pôle négatif, tandis que l'autre élément chlore, soufre, etc., va au pôle positif.

416. **Décomposition des sels.** — Lorsqu'on soumet à l'action d'un courant la dissolution d'un sel dont le métal ne décompose pas l'eau à la température ordinaire, on constate sur l'électrode négative le dépôt du métal du sel, sur l'électrode positive un dégagement d'oxygène et la présence de l'acide du sel. L'expérience peut être faite de la manière suivante :

Un tube en U (fig. 280) contient une dissolution de sulfate de cuivre : en *a* et *b* plongent des fils de platine communiquant avec les pôles d'une pile. Dès que le contact est établi, on constate autour du fil *b* un dépôt de cuivre, autour du fil *a* un dégagement d'oxygène, et l'on peut reconnaître que la liqueur est devenue acide en *a*. — Si, au lieu d'employer des fils de platine, on se sert comme électrodes de fils attaquables par l'action combinée de l'oxygène et de l'acide qui vont au pôle positif, de fils de cuivre, par exemple, on s'aperçoit qu'il n'y a plus de dégagement d'oxygène au pôle positif, et que l'électrode positive se dissout. L'explication de ce phénomène est facile à saisir : l'oxygène, à mesure qu'il arrive au pôle positif, se combine avec le fil de cuivre, y forme de l'oxyde qui se combine lui-même avec l'acide sulfurique accompagnant l'oxygène, et donne naissance à du sulfate de cuivre qui se dissout et entretient la saturation de la liqueur.

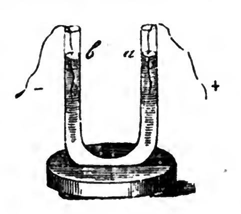


Fig. 280.

417. Il est des dissolutions qui, soumises à l'action du courant, semblent donner lieu à des résultats différents de ceux que nous venons d'étudier, quoique en réalité elles obéissent à la loi

générale. Mettons dans le tube en U de la figure 279 une dissolution de sulfate de potasse et colorons la liqueur avec quelques gouttes de sirop de violettes, dont la propriété est de rougir en présence des acides, et de verdir en présence des bases. Faisons passer le courant et nous constaterons que le liquide devient vert autour du fil *b*, contre lequel se dégagent des bulles d'hydrogène, qu'il devient rouge autour du fil *a*, où se produit de l'oxygène. La coloration verte de la liqueur en *b* nous indique la présence d'une base, la potasse ; la coloration rouge en *a* nous indique la présence d'un acide, l'acide sulfurique. Ici donc, la base semble avoir résisté à l'action décomposante du courant et s'être seulement séparée de l'acide avec lequel elle était combinée. Il n'en est rien cependant, les phénomènes se sont passés à l'origine comme dans l'expérience faite sur le sulfate de cuivre; l'oxygène et l'acide sulfurique se sont rendus au pôle positif *a*, le métal de la potasse, le potassium, au pôle négatif *b*; mais ce corps, ayant la propriété de décomposer l'eau à la température ordinaire, s'est emparé en arrivant en *b* de l'oxygène de l'eau de la dissolution pour reformer de la potasse, qui a fait virer au vert la couleur du sirop de violettes, et l'hydrogène de cette eau s'est dégagé.

Nous admettrons la loi générale suivante :

*Lorsqu'on soumet un sel à l'action d'un courant électrique, le sel est décomposé, le métal se rend au pôle négatif, l'oxygène et l'acide au pôle positif.*

### GALVANOPLASTIE. — DORURE ET ARGENTURE GALVANIQUES.

418. La galvanoplastie est l'art de modeler les métaux, en les précipitant de leurs combinaisons, par l'action d'un courant voltaïque, à la surface des objets à reproduire. — Les premières expériences, qui ont donné naissance à cette industrie devenue maintenant si importante, ont été faites, en 1837 et 1838, par M. Spencer, en Angleterre, et par M. Jacobi, en Russie.

La pratique de la galvanoplastie repose sur les principes que nous venons d'exposer sur la décomposition des sels métalliques. Soumettons à l'action décomposante d'un courant électrique une dissolution de sulfate de cuivre; terminons l'électrode négative par le moule en creux d'une médaille plongeant dans le liquide,

l'électrode positive se terminant par une lame de cuivre. Il est évident que le sulfate de cuivre va être décomposé, que le cuivre ira se déposer sur les différentes parties du moule dont il reproduira exactement les détails, si toute la surface de ce moule a été rendue conductrice de l'électricité ; quant à la lame de cuivre servant d'électrode positive, elle se dissoudra en présence de l'acide sulfurique, et, par la formation de nouvelles quantités de sulfate de cuivre, entretiendra la saturation de la liqueur. Lorsque l'expérience aura marché pendant un temps suffisant, on obtiendra une médaille en cuivre qui sera la reproduction parfaite de celle sur laquelle le moule aura été pris.

419. Cela posé, décrivons le détail des opérations.

Elles comprennent deux parties principales : 1° fabrication des moules ; 2° reproduction des objets dont ils sont l'empreinte.

Les moules sont de deux natures : les premiers *moules conducteurs de l'électricité*, sont métalliques et ordinairement en cuivre ou en métal fusible ; les seconds, *moules plastiques*, sont en cire, stéarine, gutta-percha, et ne conduisent pas facilement l'électricité.

420. **Moules métalliques.** — Les moules en cuivre s'obtiennent en produisant un dépôt électrochimique à la surface de l'objet à reproduire. S'il est en métal, il faudra, pour éviter l'adhérence du cuivre précipité à sa surface, le frotter légèrement avec une brosse imprégnée de plombagine ou d'essence de térébenthine. On le portera ensuite dans un bain de sulfate de cuivre, et on le fera communiquer avec l'électrode négative d'une pile dont l'électrode positive plongera aussi dans le bain. Le modèle se recouvrira alors d'une couche de cuivre, qui formera le moule en creux devant servir aux reproductions.

Les moules en métal fusible ne sont guère employés qu'à la reproduction des médailles. L'alliage dont on se sert le plus est composé de cinq parties de plomb, trois d'étain et trois de bismuth fondues ensemble. On devra fondre plusieurs fois cet alliage pour qu'il soit homogène. Cela fait, on le coulera sur une feuille de papier huilé, et on le remuera jusqu'à ce qu'il commence à prendre une consistance pâteuse ; on enlèvera la couche d'oxyde formée à sa surface et on frappera légèrement avec la médaille fixée dans une pièce en bois, en le maintenant au contact jusqu'à ce que le métal soit complétement froid.

421. **Moules plastiques.** — Les substances les plus employées pour la fabrication de ces moules sont le plâtre, la cire, la stéarine, la gélatine et la gutta-percha. Pour les quatre premières substances on peut opérer par voie de coulage. Pour reproduire une médaille, par exemple, en entoure sa tranche d'une feuille de carton s'élevant un peu au-dessus de la médaille qui formera alors le fond d'une petite auge dont la feuille de carton sera la paroi latérale ; on coule la substance plastique dans l'intérieur de cette auge et on la laisse s'y solidifier.

Les moules en plâtre seraient facilement attaqués par le sulfate de cuivre ; pour les rendre inattaquables, on les plonge dans un bain de stéarine fondue jusqu'à ce qu'ils en soient imprégnés. Toutefois on ne doit faire cette opération que lorsque le plâtre est parfaitement desséché.

La stéarine ne doit être employée à la confection des moules que lorsqu'elle a été mélangée avec la cire vierge.

La gélatine, en vertu de son élasticité, permet la reproduction d'objets fouillés. Elle a l'inconvénient de s'altérer dans les bains acides, mais elle devient à peu près imperméable en ajoutant à la dissolution de gélatine dans l'eau chaude 10 p. 100 de tannin dissous dans l'alcool et 10 p. 100 de mélasse. Le moule s'altérerait encore, si l'on ne prenait la précaution d'en préserver la surface extérieure avec une enveloppe de feuilles minces de gutta-percha. Malgré tous ces soins il est nécessaire, pour éviter l'altération, de faire déposer rapidement le métal, en augmentant l'intensité du courant, ce qui a l'inconvénient de donner souvent un métal un peu cassant.

Quant à la gutta-percha, elle se prête parfaitement aux opérations de la galvanoplastie. Elle est assez élastique pour permettre la reproduction d'objets fouillés, de plus elle est inattaquable par les bains. Le meilleur moyen de l'employer est de la ramollir dans l'eau bouillante, de la pétrir longtemps dans la main, de l'appliquer sur le modèle, et de soumettre le tout à une forte pression.

Les moules plastiques, dont nous venons de décrire la fabrication, ne conduisent pas l'électricité ; il faut remédier à cet inconvénient en recouvrant leur surface d'une substance conductrice. La plombagine pure convient parfaitement. On l'applique avec un pinceau dans toutes les parties de l'empreinte, puis on

frotte avec une brosse douce pour rendre les surfaces brillantes. On peut aussi appliquer sur le moule avec un pinceau très-fin une dissolution de nitrate d'argent dans l'alcool, laisser sécher, répéter trois fois l'opération et exposer ensuite la pièce à l'action du gaz hydrogène sulfuré, qui transforme le nitrate en sulfure d'argent, corps conducteur de l'électricité. On réussirait aussi en exposant le moule, après l'application de la dissolution de nitrate, à l'action de la lumière solaire qui réduirait le sel d'argent et donnerait une surface conductrice. Ce procédé par voie humide permet de recouvrir de métaux des substances végétales et animales comme des fleurs, des fruits, des insectes, etc.

422. Lorsque les moules ont été fabriqués avec les précautions dont nous venons d'indiquer les détails, on les porte au bain. La figure 281 représente un appareil qui peut servir à reproduire plusieurs médailles à la fois. Une cuve MN contient une solution saturée de sulfate de cuivre et acidulée par l'acide sulfurique ; la tringle métallique T, qui communique avec le pôle positif d'une pile, supporte plusieurs lames de cuivre ; en face de ces lames et de part et d'autre sont suspendus à des tringles AA', qui communiquent avec le pôle négatif, les moules que l'on veut reproduire. Il faut employer des courants très-faibles ; sans cette précaution le métal serait cassant.

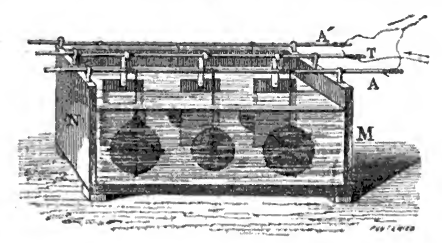


Fig. 281.

On peut aussi employer un appareil plus simple, qui n'est autre qu'une pile de Daniell et que représente la figure 281. Une cuve MN en verre, ou de toute autre substance non conductrice, contient une solution saturée de sulfate de cuivre et de petits sachets, SS', remplis de cristaux du même corps destinés à entretenir la saturation de la liqueur. Au centre de la cuve on place

plusieurs vases poreux semblables à ceux des piles de Daniell et de Bunsen ; ces vases renferment de l'eau légèrement acidulée d'acide sulfurique, au milieu de laquelle plongent des lames de zinc. Ces lames sont en communication avec une tringle isolée T, mais réunie par un fil conducteur à deux autres tringles isolées

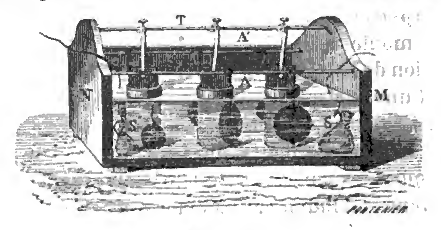



Fig. 282.

aussi qui soutiennent les moules en face des vases poreux et de part et d'autre. Le courant développé par l'action de l'acide sulfurique sur le zinc décompose le sulfate de cuivre, et le métal se dépose sur le moule. Cette méthode réussit parfaitement ; seulement la décomposition du sulfate met à chaque instant en liberté des quantités nouvelles d'acide sulfurique, et le bain devient trop acide. On y remédie au bout d'un certain temps en neutralisant en partie l'acide par l'addition d'une certaine quantité de craie ou carbonate de chaux et en filtrant la liqueur pour la débarrasser du sulfate de chaux formé.

423. La galvanoplastie a, dans ces derniers temps, donné lieu à une industrie importante que nous ne pouvons passer sous silence.

On sait que le cuivre est un métal qui résiste bien à l'action oxydante de l'air, action si nuisible au fer et à la fonte. Il y avait donc intérêt à rechercher s'il ne serait pas possible de recouvrir les objets de fer et de fonte d'une couche protectrice de cuivre. Or, les procédés que nous venons de décrire ne sont pas dans ce cas directement applicables ; en plombaginant un objet de fonte ou de fer et le plongeant dans un bain de sulfate de cuivre dans les conditions ordinaires des opérations galvanoplastiques, on n'obtient, lorsqu'on veut donner à la couche de cuivre une épaisseur suffisante, qu'un mélange non adhérent de cuivre et de fonte attaquée.

M. Oudry, d'Auteuil, est parvenu à résoudre ce problème important en recouvrant la pièce, avant de la plombaginer, d'un enduit à base de benzine qui isole complétement la fonte et la préserve d'actions chimiques destructives ; l'objet étant ainsi préparé, on le met au bain et on le recouvre d'une couche de cuivre épaisse de plus d'un millimètre. Les pièces sont ensuite attaquées avec une liqueur qui leur donne le ton du vieux bronze.

C'est par les procédés que nous venons d'esquisser à grands traits que M. Oudry, dans son usine d'Auteuil, a bronzé les fontaines de la place de la Concorde, de la place Louvois, celles de Diane et de Vénus aux Champs-Élysées, et une partie des candélabres qui éclairent les rues et les promenades de Paris.

424. **Planches gravées.** — Une des plus utiles applications de la galvanoplastie est celle que l'on en fait à la fabrication de clichés destinés à l'impression des figures dont on enrichit maintenant un si grand nombre d'ouvrages scientifiques ou autres. Autrefois le dessinateur faisait d'abord la figure sur un morceau de bois bien poli, puis le graveur, avec des outils en acier, entaillait et creusait le bois sur tous les blancs du dessin, qui apparaissait alors en relief à la surface du morceau de bois. C'était alors cette planche en bois qui servait à l'impression : pour cela on passait à sa surface un rouleau imprégné d'encre d'imprimerie, et les parties saillantes prenant seules l'encre, le dessin se trouvait facilement reproduit sur une feuille de papier que l'on appliquait avec soin sur la planche. On comprend facilement que la pression exercée devait bientôt altérer le dessin, dont elle écrasait les reliefs délicats : aussi la planche était hors de service avant d'avoir pu servir à faire un nombre d'épreuves considérable. Aujourd'hui on prend un moule en gutta-percha du dessin gravé sur bois et on reproduit ce dessin autant de fois que l'on veut par la galvanoplastie. Par ce moyen un seul exemplaire du bois gravé peut servir, par l'intermédiaire de clichés, à faire un grand nombre d'épreuves. C'est ce moyen qui permet à la librairie de livrer à des prix modiques des ouvrages illustrés qui autrefois coûtaient beaucoup plus cher.

425. **Argenture et dorure galvaniques.** — Les procédés galvaniques sont aussi employés maintenant pour recouvrir d'une couche d'or et d'argent soit des objets d'art, soit des objets devant servir à l'économie domestique, tels que cuillers, four-

chettes. MM. Elkington et Ruolz sont les premiers qui soient entrés dans cette voie vers 1840. M. Christofle, orfévre de Paris, acheta fort cher leurs brevets et sut, par son talent et sa persévérance, amener à un haut degré de perfection cette industrie dont il peut être regardé comme le véritable fondateur.

Le dépôt d'argent ou d'or doit être précédé d'une opération qui s'appelle *décapage*. Elle a pour effet d'enlever les particules d'oxydes ou de corps gras recouvrant le métal et sur lesquelles l'or et l'argent n'adhéreraient pas. Il y a deux sortes de décapages, le décapage chimique et le décapage mécanique.

Le premier s'applique au bronze ou au laiton. On commence par faire recuire la pièce, sous un feu de mottes, qui brûle les matières organiques déposées sur l'objet pendant la fabrication, et redresse en quelque sorte les molécules métalliques de la surface aplaties et comprimées par le choc du marteau. On plonge ensuite la pièce dans un bain d'acide sulfurique étendu d'eau ; ce bain est chauffé, quand il doit servir pour de petits objets, qui n'y sont laissés que fort peu de temps ; il est employé à la température ordinaire pour les grandes pièces dont l'immersion doit durer plusieurs heures. La pièce est ensuite plongée dans des bains assez faibles d'acide nitrique, d'acide sulfurique, puis lavée à grande eau et replongée dans un bain concentré d'acide nitrique, chlorhydrique et sulfurique. Sortie de ce dernier bain, elle est mise à sécher dans de la sciure de bois à 40°.

Les objets en laiton ne sont point passés au feu ; ils sont seulement plongés dans les bains acides, lavés avec une solution de potasse et séchés dans la sciure de bois.

Quant aux objets en maillechort, qui contiennent du nickel, métal trop attaquable par les acides, ils sont décapés mécaniquement, c'est-à-dire avec une brosse sur laquelle se trouve de la pierre ponce pulvérisée.

Après le décapage, les pièces sont mises au bain.

426. **Bain d'argenture.** — On emploie ordinairement pour l'argenture un cyanure double d'argent et de potassium. Voici comment on peut le préparer. On dissout 20 grammes d'argent dans 60 grammes d'acide nitrique, et on évapore jusqu'à fusion du nitrate d'argent formé. On chasse ainsi l'excès d'acide, et on transforme en oxyde de cuivre insoluble le nitrate de cuivre provenant de l'action de l'acide sur le cuivre que contient toujours

l'argent du commerce ; puis on dissout le nitrate dans 250 grammes d'eau, et on filtre pour séparer l'oxyde de cuivre.

On a fait d'ailleurs dissoudre 20 grammes de cyanure de potassium dans 100 grammes d'eau, et on ajoute petit à petit cette solution à la solution de nitrate d'argent ; il se forme alors un précipité de cyanure d'argent ; on décante, on lave le précipité, on décante de nouveau, et après plusieurs lavages et décantations qui ont eu pour effet d'éliminer le nitrate de potasse formé, on dissout le cyanure d'argent dans 20 grammes de cyanure de potassium, et on ajoute de l'eau de manière à former un litre de bain.

Le liquide est ensuite mis dans des cuves en verre ou en bois garni intérieurement de gutta-percha ; deux tringles métalliques reposent sur les bords de la cuve ; à l'une d'elles, correspondant avec le pôle négatif d'une pile, sont attachés les objets à argenter qui plongent dans le liquide ; à l'autre, communiquant avec le pôle positif, sont suspendues des lames d'argent qui se dissolvent à mesure que le dépôt de métal se forme au pôle négatif. Au sortir du bain, la pièce est recouverte d'une couche d'argent mat qui doit être brunie, avant d'être livrée au commerce. Le brunissage s'effectue en frottant la pièce avec des outils en acier parfaitement polis.

427. **Bain de dorure.** — Le bain de dorure peut s'obtenir en dissolvant 10 grammes d'or dans l'eau régale, et évaporant jusqu'à consistance sirupeuse.

On reprend par l'eau tiède, et on ajoute peu à peu 60 grammes de cyanure de potassium dans l'eau ; on étend d'eau la liqueur jusqu'à un litre.

Ce bain s'emploie ordinairement à une température de 70° et de la même manière que le bain d'argenture ; il est évident qu'on devra remplacer les lames d'argent du pôle positif par des lames d'or. A la sortie du bain d'or, la pièce est ordinairement d'une couleur terne. Pour lui donner le ton et le poli désirables, on la frotte avec une brosse en fils de laiton, au milieu d'une décoction de réglisse, puis on la *met en couleur* en la plongeant dans un bain bouillant composé de 30 parties d'alun, 30 de salpêtre, 30 d'ocre rouge, 8 de sulfate de zinc, 1 de sel marin et 1 de sulfate de fer. A la sortie de ce bain, la pièce subit l'opération du brunissage.

# CHAPITRE IX

## ACTION D'UN COURANT SUR LES AIMANTS. GALVANOMÈTRE. — AIMANTATION PAR LES COURANTS. TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

428. Les physiciens ont observé depuis longtemps que les aiguilles aimantées peuvent subir l'influence des décharges électriques produites dans leur voisinage; que l'aiguille d'une boussole peut être déviée brusquement par un temps d'orage, que son aimantation peut être détruite ou renversée. Ces faits établissent l'existence de relations intimes entre le magnétisme et l'électricité. Mais la nature de ces relations était encore inconnue, leurs lois ignorées, lorsque Œrstedt, professeur de physique à l'Université de Copenhague, vint en 1820, par une expérience devenue célèbre, jeter un grand jour sur cette question. On rapporte que, pendant une de ses leçons, l'illustre professeur saisit le fil qui réunissait les deux pôles d'une pile, et l'approchant avec vivacité d'une aiguille aimantée, s'écria : « Je ne puis croire que cet appareil soit sans action sur les aimants. » Prédiction bientôt réalisée, car l'aiguille fut immédiatement déviée et se mit en croix avec le courant. Œrstedt varia ensuite l'expérience en plaçant le fil dans différentes positions par rapport à l'aiguille, tantôt au-dessus, tantôt au dessous, et les pôles prenaient alors des positions différentes, suivant la situation et le sens du courant.

Plus tard, Ampère[1] reprit l'étude du phénomène, et, par une conception aussi simple qu'élégante, parvint à en réunir tous les cas dans un seul et même énoncé. Il personnifie en quelque sorte le courant, en supposant un petit bonhomme couché dans le fil conducteur, recevant le courant par les pieds et le rendant par la tête. Le petit bonhomme doit de plus être placé de manière à regarder l'aiguille; si celle-ci, par exemple, est au-dessous du

1 Ampère (André-Marie), savant physicien, membre de l'Académie des sciences, né en 1775 à Polémieux près de Lyon, mort en 1837.

fil, le petit bonhomme est couché sur le ventre, si elle est au-dessus, il est couché sur le dos. Il appelle alors droite et gauche du courant la droite et la gauche du petit bonhomme.

L'énoncé général donné par Ampère est alors le suivant :

*Lorsqu'on fait agir un courant, sur un aimant, l'aimant se met en croix avec le courant, et son pôle austral se porte toujours à la gauche du courant.*

Dans le cas de la figure 283, le fil étant placé au-dessous de l'aiguille et le courant allant de X en Y, le petit bonhomme cou-

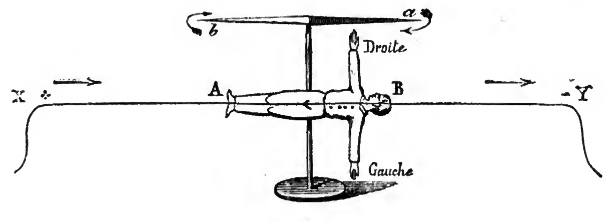



Fig. 283.

ché sur le dos a les pieds en A et la tête en B, la gauche en avant du plan de la figure, l'aiguille *ab* tournera dans le sens indiqué par les flèches et son pôle austral *a* se placera en avant du plan de la figure.

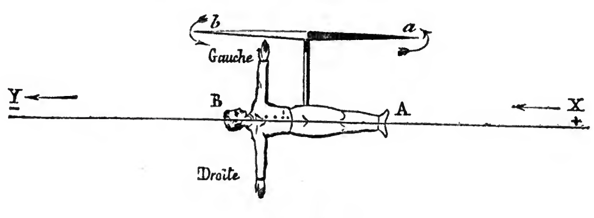



Fig. 284.

L'inspection de la figure 284 permettra d'expliquer la rotation indiquée par les flèches.

429. **Galvanomètre** ou **multiplicateur.** — L'expérience d'Œrstedt donna lieu dès 1821 à l'invention d'un appareil connu sous le nom de *galvanomètre* ou *multiplicateur* : *galvanomètre*,

parce qu'il peut servir à mesurer l'intensité des courants; *multiplicateur*, parce qu'il multiplie leurs effets et peut servir à constater leur existence, même lorsqu'ils sont très faibles.

Cet appareil fut imaginé par l'Allemand Schweiger; nous n'en exposerons que le principe.

Supposons qu'on replie un fil conducteur suivant la forme d'un rectangle ABCDE (fig. 285) au milieu duquel on placera une aiguille aimantée *ab* mobile autour d'un axe *dc*, qu'un courant parcoure ce fil dans le sens ABCDE, entrant en A et sortant en E. Il est évident qu'en appliquant à chacun des côtés du rectangle, la règle d'Ampère énoncée plus haut, on verra que chacune des portions rectilignes du courant a sa gauche en avant du plan de la figure, et qu'elles concourent toutes, par conséquent, à faire tourner l'aiguille dans le même sens et à placer son pôle austral *a* en avant du plan de la figure. Il est facile de voir que par cette disposition on a augmenté l'influence du courant sur l'aimant, puisque, si l'on vient maintenant à déplier ce fil rectangulaire et à le développer suivant le prolongement de AB fixe, les autres côtés BC, CD, DE n'agiront plus sur l'aiguille qu'à des distances plus considérables et par suite auront une action moindre.

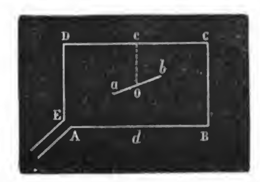


Fig. 285.

Il est évident aussi que si, au lieu de former un seul rectangle avec le fil, on l'enroule un grand nombre de fois et toujours dans le même sens autour d'un cadre rectangulaire (fig. 286), au milieu duquel l'aiguille se trouvera placée sur un axe vertical, l'appareil gagnera en sensibilité, puisque toutes les portions rectangulaires du fil agiront ensemble et d'une manière concordante.

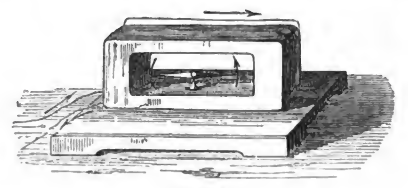


Fig. 286.

Nous devons cependant faire observer qu'on n'augmenterait pas indéfiniment la sensibilité du galvanomètre en enroulant sur le cadre des longueurs de plus en plus grandes de fil, attendu qu'il est démontré que l'intensité d'un courant diminue à mesure que la longueur du fil qu'il a à parcourir devient plus grande.

Un galvanomètre se compose donc essentiellement d'un fil enroulé un grand nombre de fois autour d'un cadre, au centre duquel se trouve placé un aimant mobile autour d'un axe vertical. Le fil est entouré de soie, substance non conductrice, afin d'en isoler les portions contiguës et de forcer le courant à parcourir toute la longueur du fil avant de quitter l'appareil.

430. Nous remarquons que, la terre exerçant son action sur l'aiguille aimantée en même temps que le courant, l'aiguille ne se met en croix rectangulairement que lorsque l'action de celui-ci est assez énergique pour que celle de la terre puisse être sensiblement négligée. Dans le cas d'un courant peu intense, l'aiguille, obéissant à la fois à son action et à celle de la terre, prend une position intermédiaire entre 0° et 90°, qui est d'autant plus voisine de la position rectangulaire que le courant est plus intense : si bien qu'alors l'appareil peut servir à mesurer l'intensité du courant ; c'est de là que lui vient son nom de *galvanomètre*.

Il est évident que l'instrument sera d'autant plus sensible que l'action de la terre sera moindre. Or il est possible d'annuler cette action de la terre par l'emploi d'*aiguilles astatiques*.

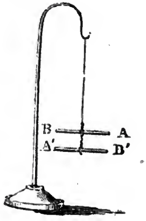


Fig. 287.

On donne ce nom à un système de deux aiguilles fixées à un même axe, solidaires l'une de l'autre et disposées de telle sorte que leurs pôles, des noms contraire, soient superposés : le pôle austral A de l'une (fig. 287) est au-dessus du pôle boréal B′ de l'autre et réciproquement ; si ces deux aiguilles sont parfaitement égales en intensité magnétique, il est évident que la terre sera sans action sur le système qu'elles forment, puisqu'elle tendra à entraîner vers un même point les pôles A et A′ qui sont disposés de manière à ne pouvoir obéir tous deux à cette action.

Examinons maintenant l'action d'un courant rectangulaire sur un système de deux aiguilles *a′b*, *ab′* (fig. 288) suspendues

à un fil sans torsion et placées l'une, *a'b*, dans le rectangle, l'autre *ab'* au-dessus. Si l'on applique la règle d'Ampère, on trouve que le côté supérieur MN du rectangle tend à porter le pôle austral *a'* en avant du plan de la figure, de même que le pôle *b'* de *ab'*. Cette action est concordante avec celle des trois autres côtés du rectangle sur l'aiguille *a'b*. Quant aux trois autres côtés BC, DC et DF, il est facile de voir qu'ils exercent sur *ab'* des actions parfaitement contraires à celles qu'ils exercent sur *a'b*, mais comme ils sont plus éloignés de *ab'* que MN, c'est l'influence de MN qui prédomine, de telle sorte que l'action du cadre sur l'aiguille supérieure doit être considérée comme s'ajoutant à celle qu'il exerce sur l'aiguille inférieure. L'appareil gagne donc en sensibilité, et de plus il a l'avantage d'être insensible à l'action de la terre.

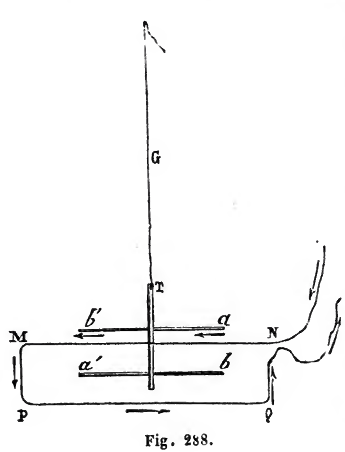


Fig. 288.

Nous devons ajouter cependant que dans la pratique on ne rend pas le système des deux aiguilles complétement astatiques afin qu'elles puissent se diriger dans l'espace, ce qui est plus commode pour les observations; mais cette force de direction est très-faible.

431. **Aimantation par les courants.** — L'expérience d'Œrstedt avait établi l'existence de relations intimes entre les fluides magnétiques et électriques. Le 4 septembre 1820, Arago rendait compte à l'Académie des sciences des phénomènes observés par le physicien danois, et le 25 du même mois il décrivit à l'Académie la mémorable expérience qui devait plus tard conduire à la découverte des télégraphes électriques. Dès qu'il apprit les résultats obtenus par Œrstedt, Arago se mit à étudier l'action du courant électrique sur le fer doux. Un fil de cuivre traversé par un courant énergique fut plongé par lui dans la limaille de fer, et il l'en

retira emportant adhérentes à lui de nombreuses parcelles de limaille. Craignant que l'action ne fût due à la présence sur la surface du conducteur d'une certaine quantité d'électricité libre, et ne rentrât alors dans le phénomène de l'attraction des corps légers par le fluide électrique libre, il répéta l'expérience en plongeant le fil dans la poussière d'un autre métal, et il reconnut que cette fois il n'y avait pas adhérence entre le conducteur électrique et les poussières métalliques. Il démontrait par là que le phénomène était dû à l'action spéciale du courant sur le fer doux, et qu'il n'était pas nécessaire que celui-ci eût reçu une aimantation préalable pour subir l'influence du courant.

Il reconnut également que si l'on mettait une aiguille d'acier non aimantée en croix avec un courant électrique, celui-ci déterminait l'aimantation, de manière que le pôle austral de l'aimant ainsi créé fût à sa gauche comme dans l'expérience d'Œrstedt.

Les phénomènes observés par Arago ne se produisaient que lorsqu'on employait des courants d'une grande intensité. Ampère imagina la disposition suivante, qui permet de réussir avec des courants beaucoup moins énergiques. Une pile de Bunsen de deux ou trois éléments suffit amplement.

Un fil est enroulé en hélice sur un tube en verre creux de petit diamètre et à l'intérieur duquel on place l'aiguille d'acier *ab* (fig. 289). Celle-ci se trouve alors en croix avec chacune des spires du fil. Si l'on fait passer un courant dans le sens indiqué par les flèches, toutes ces spires agissant d'une manière concordante, l'aimantation aura lieu, et il est évident qu'ici la gauche du courant étant du côté de *a*, le pôle austral de l'aimant formé sera en *a*, le pôle boréal en *b*.

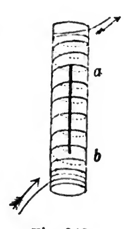


Fig. 289.

432. **Aimantation du fer doux.** — Un morceau de fer doux[1], placé dans l'intérieur d'une hélice semblable à celle que nous venons de décrire, s'aimante aussi sous l'influence du courant, mais l'aimantation ne subsiste pas après le passage du courant; dès qu'il est établi, elle se produit; dès qu'il cesse, elle cesse avec lui. Pour que la désaimantation se fasse instantanément, il est nécessaire que le fer doux employé soit bien préparé; s'il

[1] Le fer doux se distingue de l'acier en ce qu'il ne contient pas de charbon.

contient du charbon, l'aimantation pourra subsister pendant un temps plus ou moins long après l'interruption du courant.

433. **Électro-aimants.** — L'aimantation et la désaimantation faciles du fer doux sous l'influence des courants électriques sont appliquées dans la construction des électro-aimants qui sont eux-mêmes susceptibles de nombreuses applications.

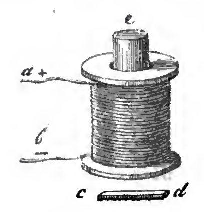


Fig. 290.

Imaginons une bobine de bois (fig. 290), sur laquelle s'enroule un fil de cuivre enveloppé de soie ; dans cette bobine est placé un barreau *e* de fer doux : les extrémités *a* et *b* du fil sont mises en communication avec les pôles d'une pile. Dès que le courant passe, le barreau s'aimante et, dans la disposition que présente la figure, le pôle austral se produira à l'extrémité supérieure, le pôle boréal à l'extrémité inférieure. Si l'on place devant le barreau une pièce de fer doux *dc*, elle sera fortement attirée : on pourra suspendre après elle des poids considérables sans la séparer du barreau *e*. Mais dès qu'on rompra la communication avec la pile, dès que le courant cessera de passer dans la bobine, l'aimantation disparaîtra instantanément et la pièce *cd* se détachera du barreau *e*.

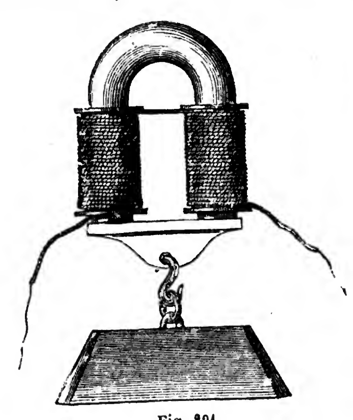


Fig. 291.

M. Pouillet a fait construire des électro-aimants capables de porter plus de 1000 kilogrammes. Il fait donner au barreau la forme d'un fer à cheval (fig. 291 et 292) : chacune de ses extrémités est entourée d'une bobine en bois sur laquelle s'enroule le fil, qui passe d'une bobine à l'autre, mais de manière que l'enroulement ait lieu dans le même

sens, et que par suite les actions des deux bobines soient concordantes. Dans la figure 292, en appliquant toujours la règle d'Ampère, il est facile de voir que le pôle boréal sera à l'extrémité par laquelle entre le courant, extrémité marquée du signe +, le pôle austral à l'extrémité marquée du signe — et par laquelle sort le courant.

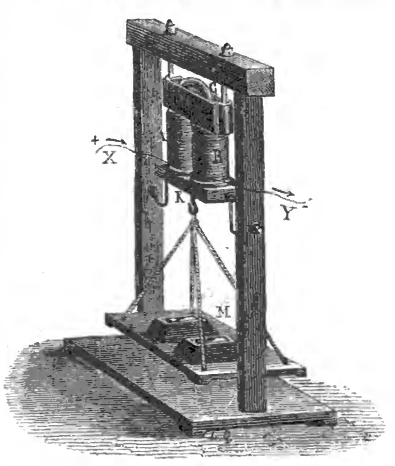


Fig. 292.

Souvent au lieu de replier le barreau de fer doux de l'électro-aimant en forme de fer à cheval, on se contente de disposer deux bobines semblables à celles de la figure 292 l'une à côté de l'autre, et de réunir les extrémités supérieures *c* des deux barreaux de fer par une pièce de fer qui leur est fixée.

## TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

434. Dès la fin du dernier siècle, les physiciens pensèrent à utiliser les effets de la bouteille de Leyde pour transmettre les signaux à distance ; la découverte de la pile et de ses effets, les travaux d'Œrstedt et d'Ampère devaient plus tard mener à la solution d'un problème si important pour la facilité de nos relations.

Dès 1820, Ampère s'exprimait ainsi dans un mémoire inséré dans les *Annales de physique et de chimie :* « On pourrait, au moyen d'autant de fils conducteurs et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, et en plaçant chaque lettre sur une aiguille différente, établir à l'aide d'une pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par les deux extrémités à celles de chaque conducteur, former une sorte de télégraphe propre à écrire tous les détails qu'on voudrait transmettre, à

travers quelques obstacles que ce soit, à la personne chargée d'observer les lettres placées sur les aiguilles. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres et établissant la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec facilité et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre. »

On voit que dans ce passage Ampère établissait d'une manière bien nette le principe de la télégraphie électrique. Mais l'appareil qu'il proposait n'était pas assez simple pour entrer dans la pratique ; de plus, la variabilité dans l'intensité des courants fournis par les piles alors connues constituait une difficulté qui ne devait être surmontée que plus tard par la découverte des piles à courant constant. Aussi le principe posé par Ampère ne fut-il sérieusement appliqué que longtemps après. Ce n'est qu'à partir de 1834, que les travaux de MM. Gauss et Weber, Alexandre, Steinheil, Wheastone, Morse, Amyot, Masson, Bréguet, Cooke, Bain, etc., etc., firent entrer la télégraphie électrique dans une voie de véritables progrès.

Les limites de cet ouvrage ne nous permettent pas de décrire tous les systèmes de télégraphes ; nous n'étudierons que celui de M. Morse et celui de M. Bréguet ; mais avant d'indiquer les parties dont ils se composent, il est important d'expliquer le principe commun sur lequel ils reposent tous.

435. Supposons qu'on veuille transmettre une dépêche de Paris à Amiens. Une pile est installée à Paris ; du pôle positif (fig. 293)

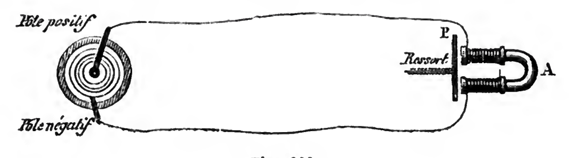



Fig. 293.

part un fil métallique qui va s'enrouler à Amiens sur un électro-aimant A, en face duquel se trouve une plaque de fer P ou armature maintenue à distance par un ressort antagoniste. Le fil, après s'être enroulé sur l'électro-aimant, retourne à Paris, où il peut être mis en communication avec le pôle négatif de la pile. Qu'on

établisse à Paris la communication entre les deux pôles, immédiatement le courant part du pôle positif, traverse le fil, passe dans l'électro-aimant à Amiens et retourne à Paris au pôle négatif. Mais le passage de l'électricité produit l'aimantation du fer doux, et par suite l'attraction de la plaque P, qui s'avance malgré la résistance du ressort trop faible pour s'opposer au mouvement. Cette attraction peut être considérée comme un premier signal transmis de Paris à Amiens. Qu'on interrompe la communication entre les deux pôles, l'aimantation cesse à Amiens et le ressort antagoniste ramène à distance la plaque P. Ce second mouvement de la plaque peut être considéré comme un nouveau signal. On comprend que l'on puisse combiner ces signaux de manière à représenter toutes les lettres de l'alphabet.

436. **Communication avec la terre.** — Pour que la transmission des dépêches puisse s'effectuer d'un lieu à un autre, il est nécessaire que les deux postes soient réunis par une série non interrompue de corps conducteurs. Du pôle positif de la pile située à la station qui expédie la dépêche part ordinairement un fil appelé fil de ligne, qui va au poste d'arrivée s'enrouler sur l'électro-aimant. Mais au lieu de faire revenir ce fil au pôle négatif de la pile, il suffit, comme l'a montré M. Steinheil, en 1837,

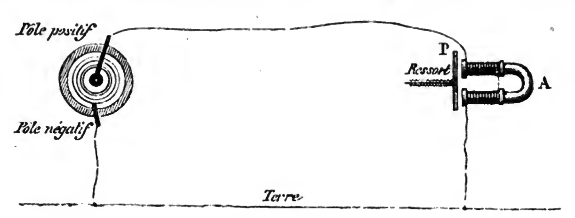



Fig. 294.

d'y attacher une lame de cuivre, qu'on plonge dans la terre (fig. 294), tandis que le pôle négatif de la pile porte aussi une plaque de cuivre plongeant dans le sol.

*437. Voici comment on peut expliquer le rôle de conducteur que joue la terre : soit une pile isolée dont les extrémités ne communiquent pas entre elles, les deux pôles acquièrent des tensions égales et contraires : si chaque pôle est mis en communication avec une sphère de *dimensions finies*, la pile produira de l'électricité,

jusqu'à ce que chaque sphère soit en équilibre de tension avec le pôle auquel elle correspond. Mais ce mouvement électrique se fait avec une rapidité telle que la charge paraît se faire instantanément et le courant n'exerce aucune influence sensible sur les appareils les plus délicats. Si, au contraire, nous employons des sphères de très-grandes dimensions, elles mettront plus de temps à se charger et le flux électrique, quoique momentané, agira sur l'aiguille d'un galvanomètre placé sur son trajet. Si chacune des sphères devient *infinie*, le pôle positif fournira alors un véritable courant d'électricité positive, et le pôle négatif un courant d'électricité négative. Or, la terre avec laquelle nous mettons en communication les deux extrémités de la pile peut être considérée, pour chacune d'elles, comme une sphère de dimensions infinies, et il en résulte qu'elle jouera le rôle de conducteur entre les deux pôles.

Cette disposition a l'avantage, non-seulement de procurer une économie de la moitié du fil à employer, mais aussi de permettre de se servir de piles moins énergiques, attendu que la terre offre moins de résistance au passage des courants que les fils métalliques, et cela est si vrai qu'on a trouvé que l'intensité des courants est presque double de ce qu'elle serait avec un fil de retour.

438. L'ensemble d'une ligne télégraphique comprend :

1° Une pile ;

2° Des fils métalliques mettant en communication les différentes stations ;

3° Un appareil destiné à transmettre les signaux et appelée *manipulateur* ;

4° Un appareil destiné à les recevoir et nommé *récepteur*.

Les piles ordinairement employées par l'administration des lignes télégraphiques sont des piles de Daniell.

Les fils sont soutenus dans l'intervalle de deux stations par des poteaux plantés en terre ; mais, pour éviter que ces poteaux ne fournissent à l'électricité une communication avec la terre, surtout dans les temps humides, on isole le conducteur en attachant aux poteaux de petits supports en porcelaine qui servent à accrocher les fils. La porcelaine étant un corps isolant empêche la déperdition du fluide. La figure 295 représente deux des modèles employés. Quand la ligne change brusquement de direction, on emploie des supports différents (fig. 296).

De kilomètre en kilomètre, on dispose sur la ligne des ap-

pareils destinés à tendre les fils. Ces appareils, appelés tendeurs, sont représentés figure 297.

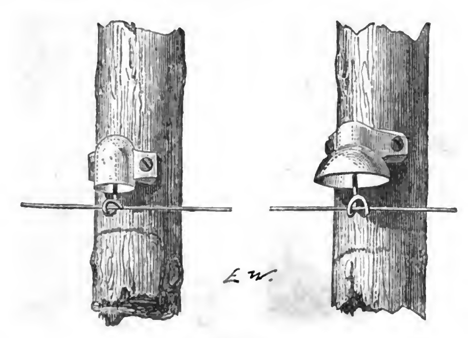


Fig. 295.

*Câbles sous-marins.* — Lorsque le fil doit relier deux stations séparées par un bras de mer, on le fait descendre au fond de

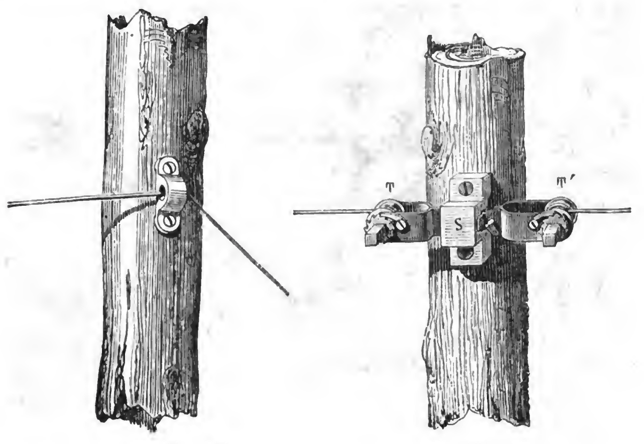



Fig. 296. Fig. 297.

l'eau après avoir entouré d'une substance non conductrice, comme la gutta-percha. Le câble sous-marin contient en général

plusieurs fils, quatre ordinairement, comme celui qui réunit Douvres et Calais. Ces quatre fils qu'on voit au centre de la figure (fig. 298) sont isolés l'un de l'autre et peuvent se suppléer

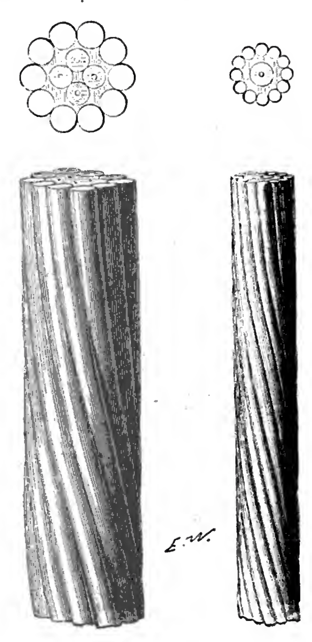


Fig. 298.

mutuellement. Pour les protéger contre les chances de rupture, on les entoure de fils de fer galvanisés enroulés en hélice.

439. **Télégraphe de Morse.** — Le système télégraphique inventé par M. Morse en Amérique s'est rapidement répandu en Europe. Il est presque exclusivement employé en France par l'administration des télégraphes.

*Manipulateur.* — Le manipulateur est d'une très-grande simplicité. Sur un socle en bois est fixée une pièce en cuivre S sur laquelle s'appuie l'axe d'un levier K (fig. 299); le levier est mis en communication avec le fil de ligne par l'intermédiaire de la

poupée C à laquelle vient s'attacher ce fil ; une seconde poupée B communique avec le pôle positif de la pile et avec une pièce métallique *b*.

Un ressort antagoniste maintient le levier horizontal. Dès qu'on appuie sur la poignée P, le levier s'abaisse, et une pointe métal-

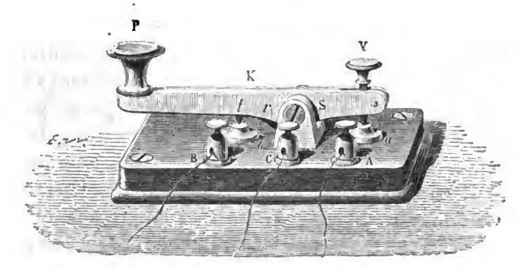



Fig. 299.

lique *t* qu'il présente vient toucher la pièce *b*, le courant arrive par la poupée B, passe en *b*, de là dans la pointe *t*, dans le levier K et par la poupée C se trouve lancé dans le fil de ligne. Dès qu'on cesse d'appuyer, le ressort antagoniste relève le levier et le courant cesse de passer. On comprend que, suivant que l'on appuie

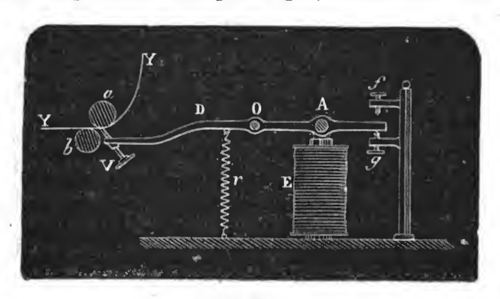



Fig. 300.

plus ou moins longtemps sur la poignée P, il se produira dans le récepteur de la station d'arrivée une aimantation plus ou moins longue.

*Récepteur*. — Le récepteur du télégraphe de Morse reproduit

exactement les mouvements imprimés au levier du manipulateur de la station qui expédie la dépêche.

L'électro-aimant E (fig. 300) est vertical; son armature A porte un levier D capable d'osciller autour d'un axe O, et se terminant par une pointe V qui lui est fixée obliquement. Lorsque le courant ne passe pas dans l'électro-aimant, le ressort antagoniste *r* maintient la pointe V à distance d'une bande de papier YY qui se déroule d'un mouvement uniforme, sous l'influence d'un appareil d'horlogerie. Dès que le courant passe, l'électro-aimant s'aimante, l'armature A est attirée, le levier bascule autour du point O, et la pointe V s'appuie sur la bande de papier, à la surface de laquelle elle trace en gaufrage une ligne plus ou moins longue, suivant la durée du contact. On comprend que cette ligne sera d'autant plus longue que le courant passera plus longtemps, et cela dépend du temps pendant lequel l'expéditeur de la dépêche appuiera sur la poignée du manipulateur. Pour que les oscillations du levier n'aient pas trop d'amplitude, on les limite à l'aide des vis *f* et *g* entre lesquelles vient buter le prolongement du levier.

On est convenu de n'employer que deux caractères différents, le point (.), qui correspond à un courant instantané, et le trait (—), auquel on donne toujours la même longueur. En combinant ces caractères de différentes manières, on reproduit toutes les lettres de l'alphabet.

Dans le télégraphe de Morse, le courant transmis par le fil de ligne n'a pas en général assez de force pour faire marcher convenablement l'appareil à signaux. Le récepteur contient un appareil spécial appelé *relais*, que l'on voit sur la gauche de la figure 301. L'électro-aimant E' de ce relais reçoit le courant de la ligne et ferme ou ouvre, par les mouvements de son armature A'D', le courant d'une pile locale qui est mise en communication avec l'électro-aimant E et fait marcher l'appareil à signaux que nous avions supposé d'abord, pour plus de simplicité, en communication avec le fil de ligne.

440. **Appareil de MM. Digney.** — MM. Digney ont remplacé avec avantage le gaufrage, qui est toujours difficile à lire, par des traits tracés par une petite roue ou molette toujours imprégnée d'encre d'imprimerie.

Cette molette se voit en *n* figure 302; elle frotte contre un tampon imprégné d'encre et très-mobile autour de son axe. Lorsque

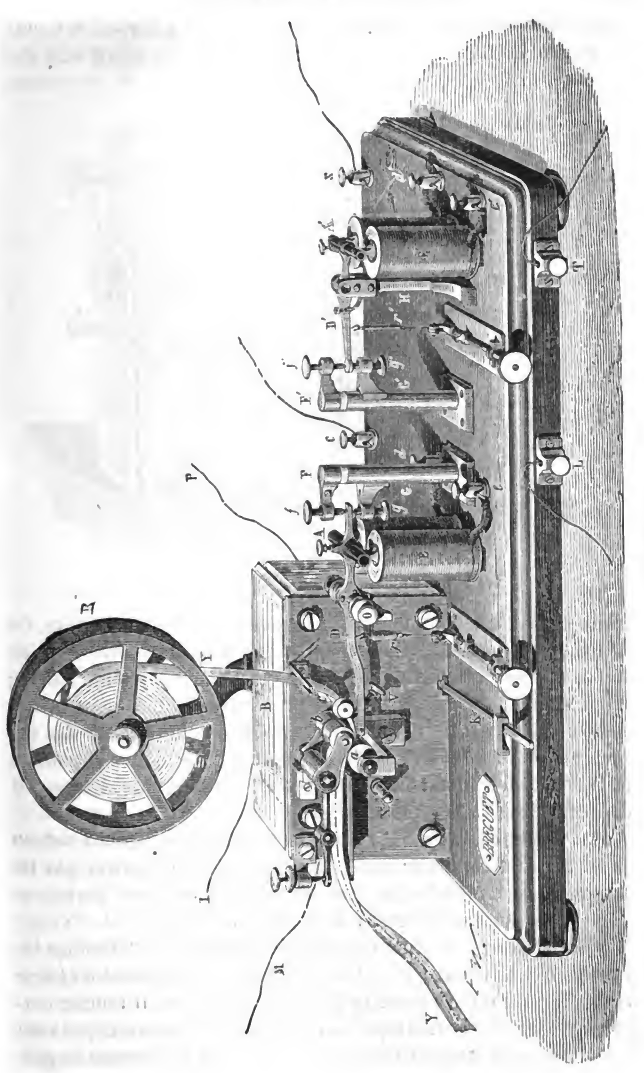


Fig. 301.

le courant passe, le levier L se relève, sa pointe *p* soulève la bande de papier et l'appuie contre la molette, qui trace sur elle des

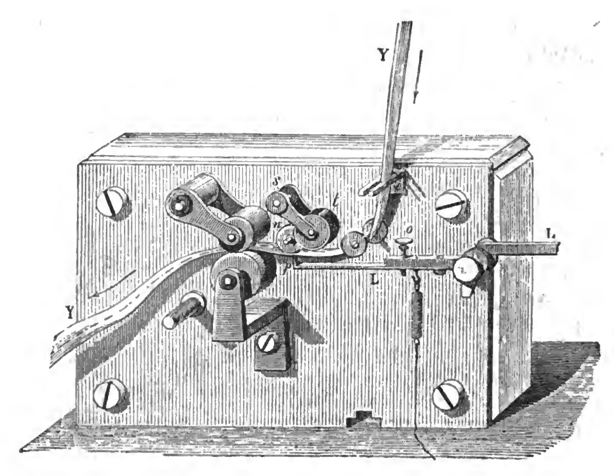



Fig. 302.

traits noirs d'une longueur variable avec la durée du contact. On conçoit que, pour mettre cet appareil en mouvement, il faille moins de force que pour produire le gaufrage du système Morse ; aussi MM. Digney ont-ils pu supprimer le relais dont nous avions indiqué la nécessité. Cet avantage, joint à celui d'offrir des caractères plus faciles à lire et moins susceptibles d'être détruits, a fait substituer dans le service des lignes télégraphiques l'appareil de MM. Digney au système Morse.

441. **Télégraphe de M. Bréguet.** — Le télégraphe à cadran de M. Bréguet est maintenant très-employé, en France, par les compagnies de chemins de fer, qui l'ont adopté pour leurs correspondances particulières. L'État l'emploie aussi.

*Manipulateur.* — Le manipulateur se compose (fig. 303) d'un levier horizontal AB capable d'osciller autour d'un point *a* et servant à fermer ou à établir le courant. Pour cela, il touche toujours par le point B un disque horizontal C qui communique avec la pile, dont le courant arrive en N, passe en N', lorsque la poi-

gnée Q est dans la position de la figure, et de là dans le disque C; l'extrémité A du levier peut dans ses oscillations ou bien être amenée au contact d'une pièce $p'$ en communication avec le fil

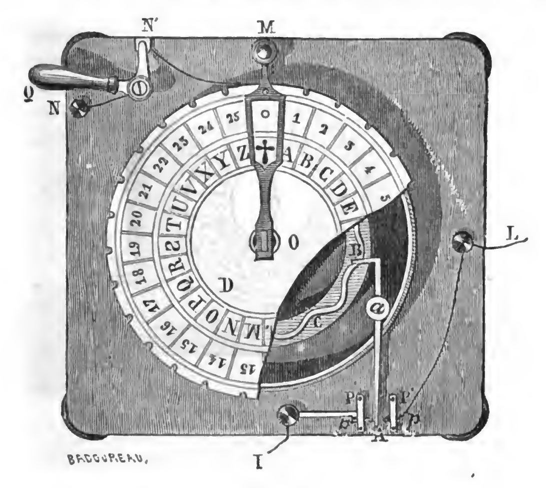



Fig. 303.

de ligne L, auquel cas le courant est lancé sur la ligne, ou bien en être éloignée et alors le courant se trouve interrompu.

Pour produire les oscillations du levier, on a imaginé d'adapter à l'extrémité B du levier une saillie qui s'engage dans une rainure sinueuse tracée sur la face supérieure du disque C. Cette rainure présente treize parties concaves et treize parties convexes; et lorsque, à l'aide de la manivelle M qui fait tourner le disque C, on fait faire à celui-ci un tour complet, le levier a parcouru toute la rainure sinueuse. Lorsqu'une partie concave se présente vis-à-vis de B, AB tourne autour de $a$, et A va toucher la pièce $p'$, par laquelle le courant est lancé sur la ligne ; lorsque, au contraire, B touche une partie convexe, AB est ramené et, A s'éloignant de $p'$, le courant se trouve interrompu.

On voit que par ce dispositif ingénieux on pourra interrompre ou établir le courant autant de fois que l'on voudra. Au-dessus du disque C se trouve un autre disque D fixe, qui porte tracées à sa

surface les vingt-cinq lettres de l'alphabet et une croix qui sert à indiquer qu'on passe d'un mot à l'autre.

Pour transmettre le mot FRANCE, on transporte la manivelle

Fig. 304.

d'abord en F, puis en R, en A, en N, en C, en E, mais en tournant toujours dans le même sens, et en s'arrêtant un instant sur

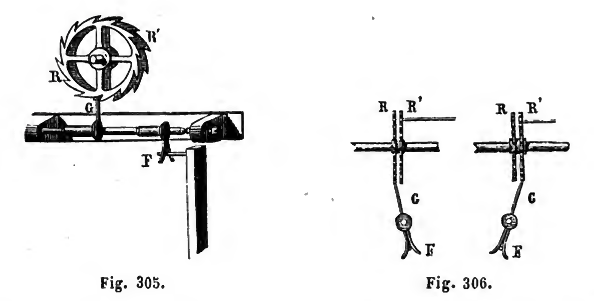



Fig. 305. Fig. 306.

chaque lettre du mot; le disque C tourne en même temps que la manivelle qui lui est fixée et le nombre des oscillations du levier est représenté par le nombre de lettres au-dessus desquelles on est passé. Ainsi, par exemple, lorsque l'opérateur a amené la

manivelle sur la lettre F, le levier a déjà fait six oscillations, par suite le courant a été établi trois fois et interrompu trois fois.

*Récepteur.* — Le récepteur se compose d'un cadran dont les divisions sont disposées comme celles du manipulateur et d'un mouvement d'horlogerie placé derrière et caché dans la boîte qui enveloppe l'appareil (fig. 304). Une aiguille commandée par le mouvement d'horlogerie serait entraînée par lui, comme les aiguilles d'une montre, si une tige métallique reliée à l'électro-aimant ne venait suspendre sa marche. Pour cela deux roues den-

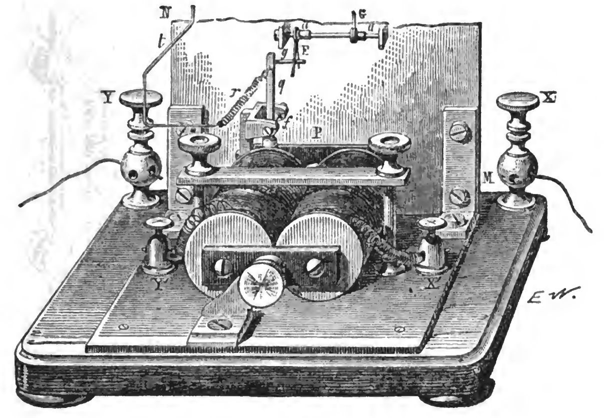



Fig. 307.

tées R et R' (305 et 306) sont disposées parallèlement l'une à l'autre sur un même axe. Elles portent chacune treize dents, et les dents de la roue R correspondent aux intervalles des dents de la roue R' et réciproquement. L'armature P (fig. 307 et 308) de l'électro-aimant porte une tige *g* engagée dans la fourchette F qui est elle-même fixée à l'axe *aa*. Lorsque ce courant ne passe pas, l'armature est maintenue à distance par un ressort antagoniste *r*. Supposons qu'alors une tige G solidaire de l'axe *aa* soit engagée dans la roue R et par suite suspende la marche du mouvement d'horlogerie qui commande les roues R R' ; dès que le manipulateur lance le courant dans l'électro-aimant, celui-ci s'aimante, attire l'armature P et par suite fait mouvoir la tige G, celle-ci

quitte la roue R et l'appareil d'horlogerie met en mouvement les roues R et R' et par suite l'aiguille sur le cadran. Ces roues sont

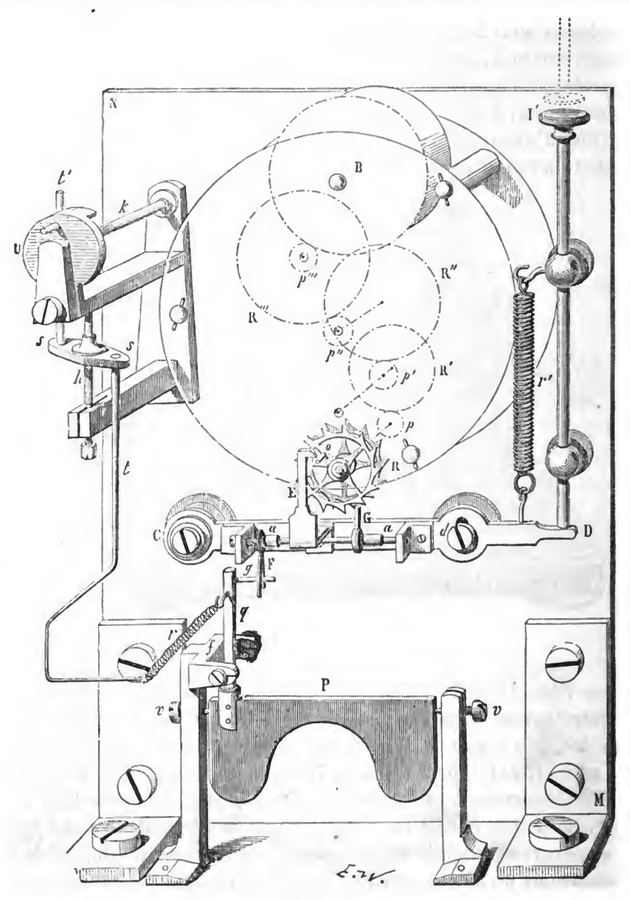



Fig. 302.

bientôt arrêtées par la tige G qui va s'engager dans les dents de la roue R'; et comme, par suite de la disposition que nous avons

décrite, les dents des roues ne sont qu'à $\frac{1}{24}$ de circonférence l'une de l'autre, l'aiguille ne peut tourner que de $\frac{1}{24}$ de circonférence.

Lorsque le manipulateur interrompra le courant, le ressort antagoniste ramènera l'armature de l'électro-aimant à sa position et par conséquent la tige G viendra de nouveau s'engager dans les dents de la roue R. Mais, pendant le temps qu'elle met à aller de la roue R' à la roue R, le système et, par suite, l'aiguille tournent encore de $\frac{1}{24}$ de circonférence. On comprend maintenant que les mouvements de la manivelle du manipulateur soient exactement reproduits par l'aiguille du récepteur, que chaque fois que la manivelle sera arrêtée sur une lettre à transmettre, l'aiguille s'arrêtera devant la même lettre du récepteur, à condition qu'au début la manivelle et l'aiguille soient parties de la croix, signe d'arrêt.

442. L'administration des télégraphes emploie maintenant assez souvent le telégraphe Hughes et quelquefois l'appareil Caselli. Le premier transmet la dépêche et l'imprime en caractères d'imprimerie : le second reproduit avec une exactitude parfaite l'écriture de celui qui a rédigé la dépêche. Nous ne décrirons pas ces appareils dont la construction est assez compliquée.

443. **Parafoudre.** — Sous l'influence de l'électricité atmosphérique les fils télégraphiques sont parcourus par des courants qui peuvent troubler la marche des appareils. D'un autre côté, la foudre, en tombant sur un poteau, se propage quelquefois dans le fil de ligne et peut arriver dans un poste, y fondre les fils et atteindre dangereusement les employés. M. Bréguet a inventé un appareil appelé *parafoudre*, qui met à l'abri de ces accidents. Il se compose (fig. 309) d'une plaque J dentelée, sur son bord de droite, en face d'une autre plaque I dentelée aussi et dont les dents sont en regard de celles de la première. La

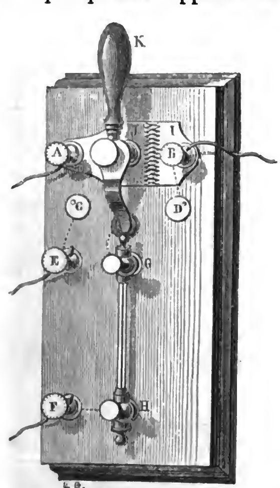


Fig. 309.

plaque I communique avec le sol par le fil partant du bouton B. Un commutateur à poignée K peut mettre la plaque J en communication avec une poupée G d'où part un fil très-fin de platine enveloppé dans un tube de verre et allant aboutir à une autre poupée H. Le fil de ligne aboutit en A, et de la poupée F qui communique avec H part le fil du récepteur. Il en résulte que si le commutateur communique avec G, le courant de la ligne gagne le récepteur en traversant le fil de platine. Quand le temps n'est pas orageux, le courant n'a jamais assez de tension pour amener une décharge électrique entre les points J et I : mais si l'électricité atmosphérique détermine des courants trop intenses dans le circuit, l'excès d'électricité jaillit sous forme d'étincelles entre les dents des deux plaques et s'écoule dans le sol. Si même le courant qui se dirige vers le récepteur est trop intense, le fil de platine est fondu et la communication avec le

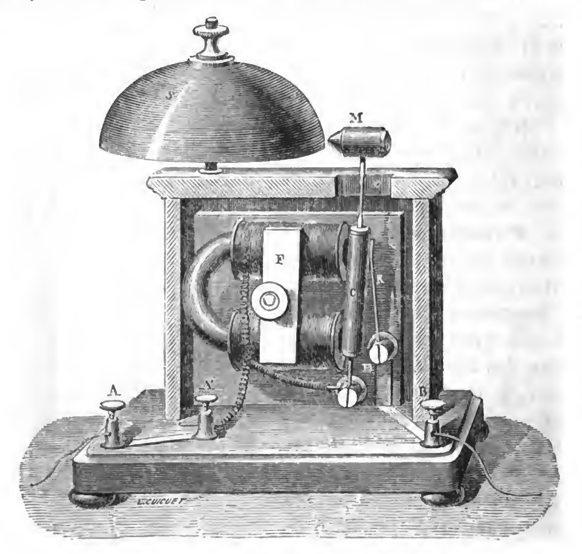



Fig. 310.

récepteur est interrompue avant que celui-ci ait été détérioré. Quand l'orage est trop fort, on cesse toute correspondance et on

place le commutateur K sur le bouton D' qui communique avec I. Alors toute l'électricité s'écoule dans le sol.

444. **Avertisseur.** — On se sert aussi dans les télégraphes de sonneries électriques destinées à avertir les employés de se tenir prêts à recevoir une dépêche. La sonnerie se compose d'un électro-aimant (fig. 310) dont l'armature en fer se termine d'une part par un marteau M qui peut frapper sur un timbre S, d'autre part par une lame élastique qui le fixe dans une poupée E. Quand l'électro-aimant n'est pas aimanté par le passage du courant, l'élasticité de la lame maintient le marteau à une petite distance du timbre et l'appuie contre un ressort R qui, fixé en E, communique avec le bouton B, d'où part un fil communiquant avec le sol. Le fil de ligne arrive en A et se trouve relié par l'intermédiaire des poupées A et A' avec le fil de l'électro-aimant qui est aussi relié à E de telle sorte que, lorsqu'un courant arrive, le circuit suivi par lui est AA'ECRDB : dès que le courant passe, l'électro-aimant s'aimante, et le marteau attiré frappe le timbre; mais, par ce mouvement, le contact avec R cesse et, le courant se trouvant interrompu, l'aimantation cesse, et l'élasticité de la lame ramène l'armature dans la position primitive, le courant passe de nouveau, un second coup est frappé sur le timbre et ainsi de suite.

445. **Sonnettes électriques.** — L'appareil que nous venons de décrire est employé maintenant comme sonnette électrique destinée à appeler les domestiques. Il est placé dans un endroit où il puisse être entendu par eux et communique avec la pile électrique par des fils qui se rendent dans les appartements ; dans chaque appartement le fil qui y arrive se trouve interrompu, mais ses deux tronçons peuvent être mis en communication à l'aide d'un bouton sur lequel il suffit d'appuyer. Dès que cette communication est établie, la sonnerie marche.

446. **Sonneries des chemins de fer.** — Les sonneries électriques sont aussi fréquemment employées dans les chemins de fer. On sait qu'à une certaine distance des gares se trouvent souvent placés des disques dont la position indique aux mécaniciens des trains qui arrivent si la voie est libre et s'ils peuvent pénétrer en gare. Ces disques se manœuvrent de la gare elle-même à l'aide de leviers et de fils de fer. Mais il faut que l'employé qui a manœuvré le disque soit sûr que l'appareil a fonc-

tionné et que sa position indique au mécanicien si la voie est libre. A cet effet une pile est en rapport avec une sonnerie qui se trouve dans la gare, et les choses sont disposées de telle sorte que, lorsque le disque est tourné à l'arrêt, il ferme le circuit et met la sonnerie en activité. De là résulte un carillonnement qui dure jusqu'à ce que, la voie redevenant libre, le disque soit placé dans une position inverse.

---

# CHAPITRE X

## INDUCTION

447. Nous terminerons l'exposé des principaux phénomènes électriques et de leurs applications en étudiant une nouvelle source d'électricité dynamique découverte par M. Faraday. Les

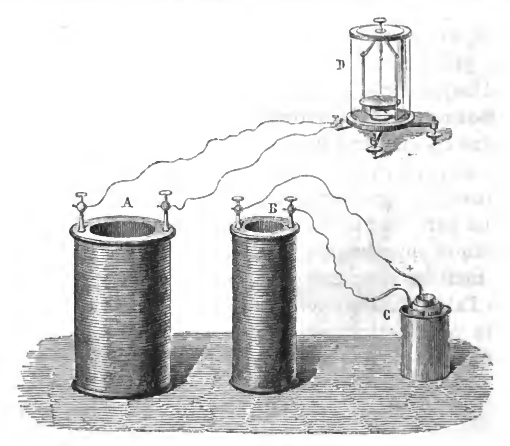



Fig. 311.

limites de cet ouvrage ne nous permettant pas d'exposer tous les détails de cette théorie si féconde, nous en indiquerons seulement les principes fondamentaux.

448. **Induction par les courants.** — M. Faraday a découvert en 1830 que l'on fait naître en général un courant dans un circuit métallique fermé, lorsqu'on approche ou qu'on éloigne de ce dernier un autre circuit traversé lui-même par un courant. L'expérience suivante peut servir a établir ce principe.

Les deux extrémités du fil d'une bobine A (fig. 311) sont mises en communication avec le fil d'un galvanomètre.

Si l'on vient à approcher brusquement de cette bobine, une autre bobine B traversée par le courant d'une pile C, on voit le galvanomètre indiquer par la déviation de son aiguille que la bobine A est parcourue par un courant de sens inverse à celui de B. Le courant de B est appelé courant *inducteur*, celui de A courant *induit*. L'aiguille du galvanomètre revient bientôt à sa position primitive, ce qui indique que le courant induit n'a qu'une durée passagère.

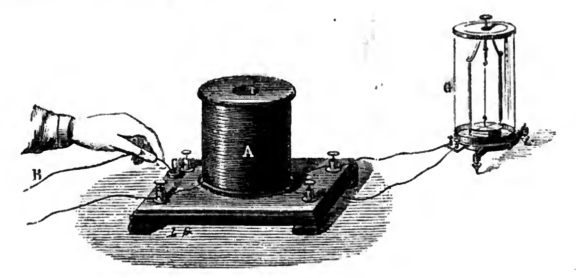



Fig. 312.

Si l'on éloigne ensuite brusquement B, le galvanomètre indique l'existence d'un nouveau courant qui parcourt A et est direct par rapport à celui de B.

Les courants d'induction peuvent aussi être créés de la manière suivante. Sur une même bobine A (fig. 312) sont enroulés côte à côte deux fils de cuivre entourés de soie pour qu'il n'y ait pas entre eux de communication. L'un est par ses deux extrémités en communication avec un galvanomètre, l'autre avec les deux poupées qui sont sur la gauche de la figure. Si l'on vient à faire passer un courant dans ce dernier, le galvanomètre indique immédiatement que le premier fil est parcouru par

un courant *induit inverse;* lorsqu'au contraire on supprime la communication avec la pile, une nouvelle déviation du galvanomètre indique la création d'un courant *induit direct.*

449. Une augmentation d'intensité dans le courant inducteur produirait un courant *induit inverse*, et une diminution d'intensité un courant *induit direct.*

450. **Induction par les aimants.** — Les aimants peuvent aussi donner lieu à des courants d'induction.

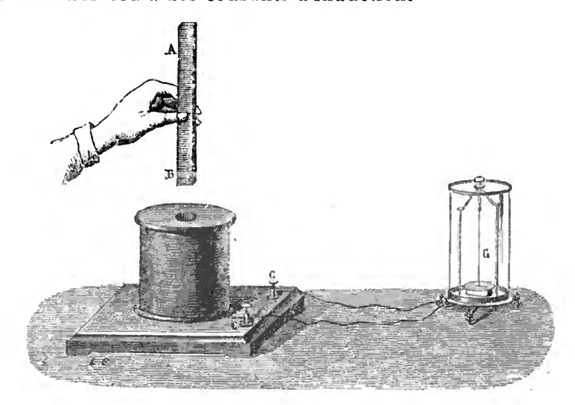



Fig. 313.

A l'instant où l'on plonge (fig. 313) un barreau aimanté AB dans une bobine à un seul fil, et à l'instant où ce barreau est retiré, le galvanomètre indique l'existence d'un courant induit.

451. **Induction par l'aimantation et la désaimantation du fer doux.** — Si l'on place dans l'intérieur d'une bobine B (fig. 314) un morceau de fer doux C, et qu'on approche de lui un barreau aimanté D, le fer doux s'aimante et cette aimantation subite détermine la production d'un courant induit qu'acuse le galvanomètre. Si l'on éloigne D, C se désaimante et la désaimantation produit à son tour un nouveau courant induit inverse du premier.

*452. **Bobine de M. Ruhmkorff.** — Diverses machines, celles de Pixii, de Clarkes, de MM. Masson et Bréguet, de M. Ruhmkorff ont été construites pour utiliser les effets des courants d'in-

duction. Nous dirons d'abord quelques mots de celle que construisit M. Ruhmkorff et dont les perfectionnements ont valu à son auteur

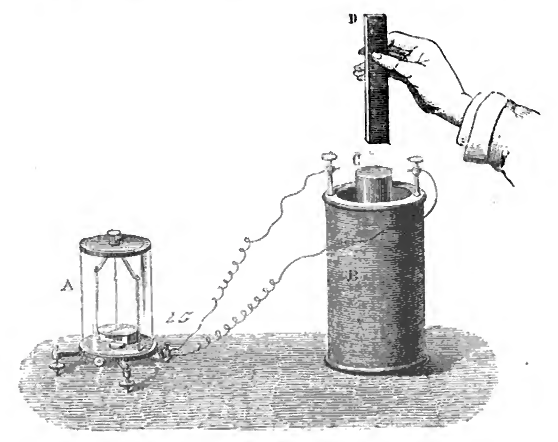



Fig. 314.

un prix de cinquante mille francs fondé par Napoléon III. — Les courants induits, dans la machine de M. Ruhmkorff, sont produits par les alternatives de rupture et de rétablissement d'un

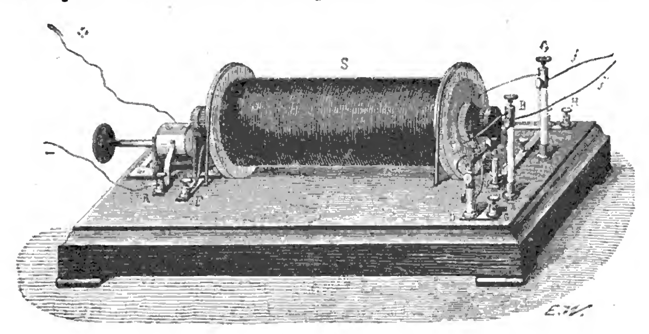



Fig. 315.

courant voltaïque ; l'effet est augmenté par l'action d'un faisceau de fils de fer doux.

L'ensemble de l'appareil est représenté par la figure 315. Un faisceau de fils de fer doux renfermé dans un cylindre de bois sur lequel s'enroule d'abord le fil inducteur qui n'a que 40 mètres de longueur environ et 2 millimètres de diamètre, forme l'appareil inducteur, qui est introduit dans la cavité de la bobine S; sur cette bobine s'enroule le fil induit qui est très-fin et qui dans certains appareils a une longueur de 100 kilomètres. Les deux extrémités du fil induit communiquent avec les boutons B et C portés sur des colonnes isolantes. Les deux extrémités du fil inducteur communiquent avec les poupées D et F.

Pour développer les courants induits, il faut arriver à interrompre et rétablir un grand nombre de fois le courant dans le fil inducteur. On se sert pour cela d'*interrupteurs* dont la disposition varie suivant la force des bobines. Nous ne décrirons que celui de M. de la Rive, qui est installé sur la bobine que représente la fig. 315. Mais pour rendre l'explication plus claire, nous l'examinerons à part sur la figure 316. Le courant de la pile arrive en E, passe de là dans le marteau M qui peut osciller autour de O, gagne la colonne C (qui dans la figure 315 est représentée par D), pour passer dans le fil $f'$ inducteur et sortir en $f''$. Mais pendant que le courant passe, le faisceau de fils de fer doux s'aimante, attire le marteau M; dès que celui-ci cesse de toucher E, le courant est interrompu : l'aimantation cesse alors, le marteau retombe, et en venant de nouveau toucher E rétablit le courant et ainsi de suite.

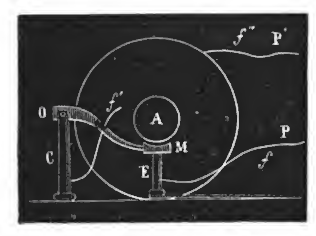


Fig. 316.

De ces interruptions et rétablissements successifs du courant inducteur résultent des courants tantôt directs, tantôt inverses dans la spirale induite.

*453. **Effets principaux de la machine de M. Ruhmkorff.** — Les effets obtenus avec la machine de M. Ruhmkorff sont très-remarquables et manifestent l'intensité des courants induits.

Lorsqu'on prend avec les mains humides les fils attachés en B et C, ou des poignées métalliques communiquant avec ces fils,

on reçoit de très-violentes commotions, alors même que le courant inducteur n'est fourni que par un seul élément Bunsen : un plus grand nombre d'éléments pourrait les rendre très-dangereuses.

En fixant aux deux colonnes B et C des fils de cuivre, on peut faire jaillir entre leurs extrémités de très-fortes étincelles. M. Ruhmkorff construit des appareils qui peuvent fournir des étincelles de 30 et 40 centimètres de longueur, se succédant avec un grand bruit.

En faisant passer le courant induit dans le vide de l'œuf électrique ou dans des tubes dits tubes de Geissler, contenant des gaz très-raréfiés, on obtient des effets lumineux d'une rare beauté. La lumière prend les nuances les plus riches; elle se trouve interrompue par des régions obscures qui font un contraste frappant. La lumière est alors dite *stratifiée*. C'est à M. Quet que l'on doit la découverte des ces phénomènes de stratification.

Disons enfin que l'appareil de M. Ruhmkorff est souvent employé pour faire jaillir, à des distances considérables, des étincelles destinées à produire l'explosion des mines.

454. **Machine magnéto-électrique de Clarkes.** — Sans entrer dans les détails de construction de la machine de Clarkes, nous dirons qu'elle se compose de deux bobines BB′ (fig. 317), portant suivant leur axe un cylindre de fer doux. Ces bobines peuvent être mises en mouvement rapide de rotation autour d'un axe XX′ et en présence d'un fort aimant en fer à cheval A. Le mouvement des bobines qui tantôt se rapprochent des pôles de A, tantôt s'en éloignent, détermine des variations dans l'intensité du magnétisme que développe l'aimant A dans les cylindres de fer doux : ces variations déterminent elles-mêmes des courants d'induction dans les fils des bobines BB′.

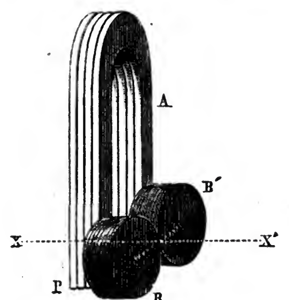


Fig. 317.

Ces courants jouissent de la propriété de décomposer l'eau, de donner des étincelles, etc.

Dans ces derniers temps, on a fait une très-heureuse applica-

tion du principe de la machine de Clarkes dans la construction d'appareils magnéto-électriques destinés à la production de la lumière électrique que l'on ne pouvait produire qu'à l'aide de

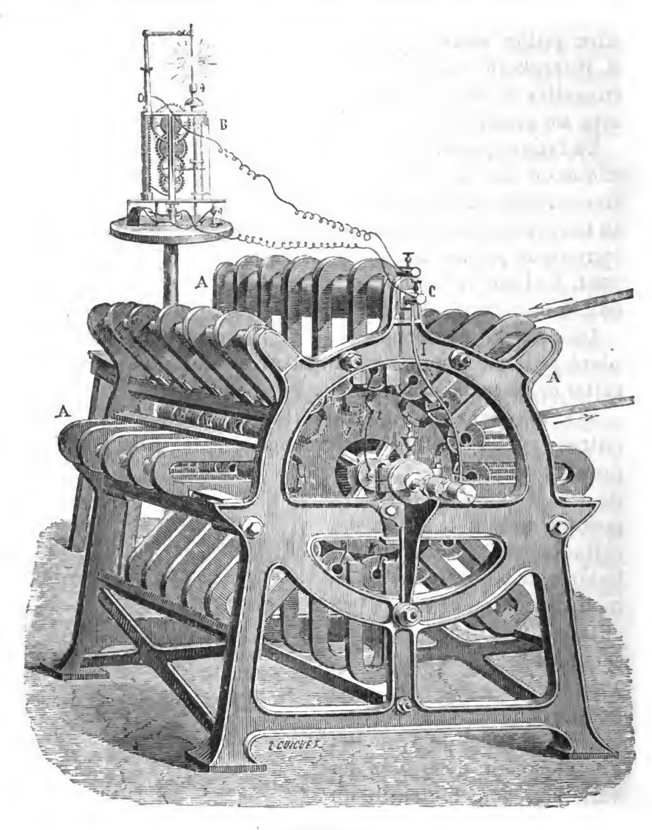



Fig. 318.

fortes piles, dont l'installation et l'entretien sont coûteux.

La compagnie *l'Alliance* construit maintenant des machines qui sont employées à l'éclairage des phares.

Des aimants fixes, en fer à cheval, sont distribués en huit séries (fig. 318) à égale distance d'un arbre que met en mouvement une machine à vapeur. Cet arbre porte des roues sur la périphérie desquelles sont placées des bobines, qui peuvent ainsi être mises en mouvement de rotation entre deux rangées d'aimants et recevoir leur action inductrice. Tous les courants d'induction produits sont lancés dans un appareil régulateur de lumière électrique OB. La figure 319 montre l'une des roues sur

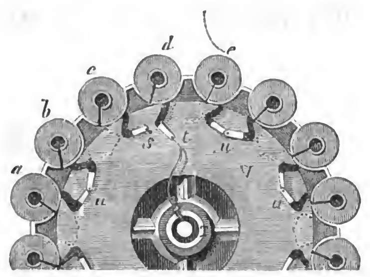



Fig. 319.

la périphérie desquelles sont placées les bobines *abc*.

On a toujours dans chaque station un double matériel, deux régulateurs de lumière électrique, deux machines magnéto-électriques, deux machines à vapeur, afin que, dans le cas d'accident, il n'y ait pas d'interruption dans l'éclairage.

Un certain nombre de phares sont déjà éclairés à la lumière électrique. Nous citerons ceux de Sainte-Adresse, près du Havre. Le même système d'éclairage a été employé aux ardoisières d'Angers.

# LIVRE QUATRIÈME

## ATTRACTION MOLÉCULAIRE ET ACOUSTIQUE

---

## CHAPITRE PREMIER

### ATTRACTION MOLÉCULAIRE. — CAPILLARITÉ.

455. **Attraction moléculaire.** — L'attraction moléculaire est la force qui agit entre les parties infiniment voisines des corps pour les rapprocher. Elle s'exerce dans un grand nombre de cas et prend alors différents noms.

456. **Cohésion.** — Nous avons vu (41) que l'attraction moléculaire prend le nom de cohésion lorsqu'elle s'exerce entre les particules matérielles d'un même corps pour les maintenir unies entre elles. Nous avons prouvé l'existence de cette force et étudié les circonstances dans lesquelles elle agit.

457. **Adhésion.** — Lorsque l'attraction moléculaire est exercée par un liquide soit sur un solide, soit sur un autre liquide, elle est appelée *adhésion*. L'expérience suivante peut mettre cette force en évidence. Plaçons à la surface de l'eau un disque A B (fig. 320) en verre bien débarrassé, par des lavages, de matières grasses et de poussière : relions ce disque à l'aide d'un fil au plateau D d'une balance, et faisons-en la tare en C. Nous constaterons que, lorsque nous voudrons séparer le disque du liquide, celui-ci s'élèvera sensiblement à la suite du disque, et

pour y arriver, il nous faudra mettre des poids dans l'autre plateau C de la balance. Gay-Lussac a montré que, lorsqu'on employait un disque de glace ayant un diamètre égal à $0^m,118$, il fallait mettre en C un poids de 59 gr., 40.

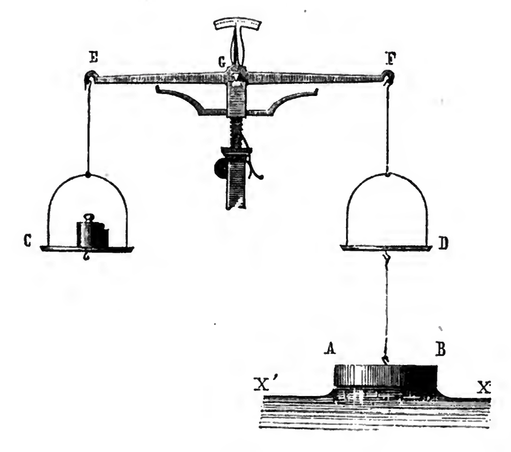



Fig. 320.

L'expérience précédente prouve aussi que l'attraction moléculaire s'exerce entre les molécules d'un même liquide. Car, si elle ne s'exerçait pas, il ne faudrait, pour séparer le disque de l'eau, qu'un poids bien faible égal au poids de la couche excessivement mince de liquide qui est en contact avec lui.

438. **Phénomènes capillaires.** — Les attractions dont nous venons de parler sont la cause de phénomènes désignés sous le nom de phénomènes *capillaires*, que nous allons rapidement exposer. — Lorsqu'on verse un liquide dans un tube à deux branches, dont l'une est large et l'autre très-étroite (fig. 321), les niveaux dans les deux branches ne sont plus sur le prolongement l'un de l'autre, comme l'indique la théorie des vases communiquants. L'eau, l'alcool, l'éther, s'élèvent, dans le tube étroit, dit *capillaire*, le mercure s'y déprime; de plus les surfaces terminales ne sont plus planes : celle de l'eau est concave, celle du mercure convexe.

Des phénomènes du même genre s'observent chaque fois qu'on

plonge un solide dans un liquide. Si le liquide mouille le solide, il s'élève contre sa surface, en présentant une surface concave ; il se déprime dans le cas contraire, en présentant une surface convexe.

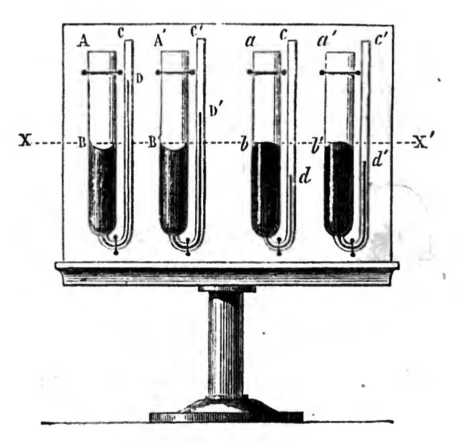



Fig. 321.

Nous ne donnerons pas la théorie assez compliquée de ces phénomènes : nous nous contenterons d'en indiquer quelques applications. C'est par la capillarité que s'expliquent la circulation de la séve et les mouvements des corps légers flottant à la surface des liquides. Aussi, lorsqu'on diminue suffisamment leur distance, on les voit se rapprocher lorsqu'ils sont tous deux mouillés par le liquide, ou lorsqu'ils ne peuvent l'être ni l'un ni l'autre. Ils se fuient au contraire quand le liquide mouille l'un sans mouiller l'autre. On peut réaliser cette expérience avec des balles de liége dont les unes ont leur surface nette et sont mouillées par l'eau, dont les autres ont leur surface enduite de noir de fumée et ne peuvent être mouillées par le liquide.

# CHAPITRE II

## PRODUCTION, PROPAGATION, VITESSE DU SON.

On appelle *Acoustique* la partie de la physique qui s'occupe de l'étude des sons, de leur cause, de leur propagation et des conditions dans lesquelles ils se produisent.

459. **Vibrations des corps sonores.** — Quand un corps rend un son, ses molécules exécutent de part et d'autre de leur position d'équilibre de petits mouvements de va-et-vient que l'on désigne sous le nom de *vibrations*. Les expériences suivantes vont nous en démontrer l'existence.

460. **Vibrations des corps solides.** — Lorsque (fig. 322) on serre une verge métallique AB par une de ses extrémités B entre les mâchoires d'un étau E, et qu'on l'écarte de sa position d'équilibre AB, on la voit exécuter des mouvements de va-et-vient de part et d'autre de AB. Lorsque la verge est assez courte, ses vibrations sont accompagnées d'un son qui cesse dès qu'elle revient au repos.

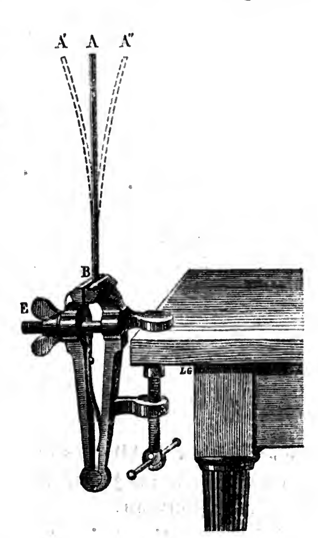


Fig. 322.

Quand une cloche résonne, si l'on approche une pointe fine de sa paroi, on entend très-distinctement une série de chocs qui attestent l'existence du mouvement vibratoire. On peut donner à l'expérience une autre forme, en suspendant au sommet et à l'intérieur de la cloche un fil qui soutient une balle de liége; faisons résonner la cloche et

inclinons-la de manière que la balle vienne toucher ses parois. Dès qu'il y a contact, celle-ci se trouve repoussée par le choc qu'elle reçoit de la cloche.

Ébranlons un diapason BC (fig. 323) et, pendant qu'il parle, approchons de l'une de ses branches une bille d'ivoire D sus-

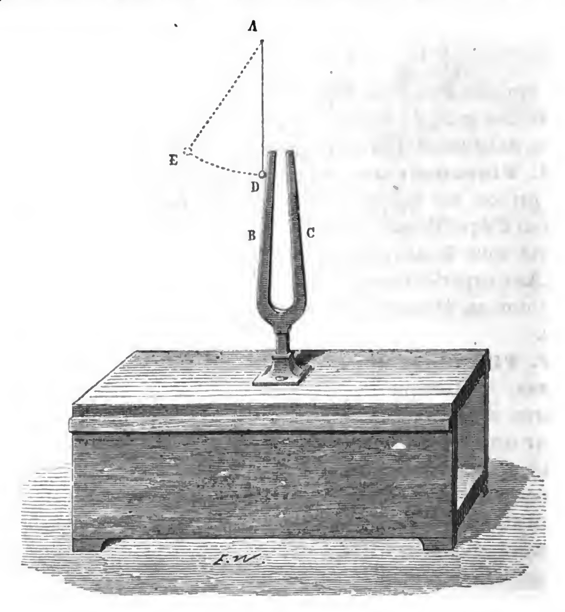



Fig. 323.

pendue à un fil AD. Dès que la bille touche le diapason, elle est lancée par lui jusqu'en E et revient le toucher pour être lancée de nouveau.

461. **Vibrations des corps gazeux.** — Un tuyau rectangulaire a l'une de ses faces fermée par une paroi de verre ; il est placé verticalement sur une soufflerie à l'aide de laquelle on lance un courant d'air. Le tuyau rend alors un son, et si, pendant qu'il parle, on descend dans son intérieur une membrane mince couverte de sable et tendue sur un petit anneau de carton sou-

tenu par trois fils, elle se met en vibration sous l'influence des vibrations de l'air du tuyau et le sable est projeté. Ce mouvement vibratoire se transmet au loin en dehors du tuyau, et une

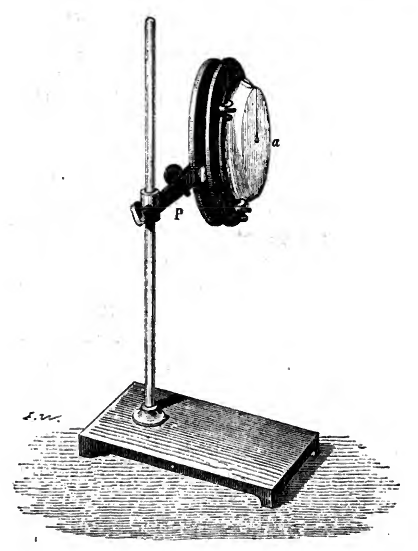



Fig. 324.

autre membrane tendue sur un cadre et placée à distance participe au mouvement des couches atmosphériques et le communique à un pendule *a* (fig. 324) suspendu à sa surface.

462. **Vibrations des corps liquides.** — Wertheim est parvenu à faire parler des tuyaux plongés dans un liquide, en y injectant un courant de ce même liquide, dont les vibrations produisaient le son rendu par le tuyau.

463. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Les mouvements vibratoires que nous venons d'étudier ont besoin, pour produire une impression sur l'organe de l'ouïe, de se transmettre jusqu'à lui par une suite non interrompue de milieux pondérables. Dans le cas contraire les vibrations des corps ne pro-

duisent pas de son. Otto de Guerike l'a démontré par l'expérience suivante :

On dispose sur le plateau de la machine pneumatique une sonnerie à timbre mue par un mouvement d'horlogerie et reposant sur un coussinet en ouate, on la couvre avec la cloche de la machine, puis on fait le vide. A mesure que la raréfaction de l'air augmente, le son s'affaiblit, quoiqu'on voie toujours le marteau frapper le timbre ; quand la pression n'est plus que de quelques millimètres, le son est tout à fait éteint, mais il renaît dès qu'on laisse rentrer l'air sous la cloche. Le coussinet en ouate a pour but d'amortir les vibrations de la sonnerie qui se transmettraient au dehors par la platine de la machine.

464. **Propagation du son à travers les solides.** — L'expérience suivante prouve la transmission du son par l'intermédiaire des corps solides. Si l'on place l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre, et qu'une personne gratte avec l'ongle l'autre extrémité, on peut entendre distinctement le son produit. Ce son est cependant assez faible pour n'être perçu qu'à condition d'avoir l'oreille placée contre la poutre.

On sait que les décharges lointaines d'artillerie sont parfaitement entendues au loin, si l'on place l'oreille contre le sol, même dans des cas où le son n'arrive pas à celui qui écoute en se tenant debout.

Le mineur, en creusant sa galerie, entend les coups du mineur qui vient à sa rencontre et juge ainsi de sa direction.

465. **Propagation du son à travers les liquides.** — Les liquides transmettent aussi le son : lorsque deux plongeurs sont au milieu de l'eau, l'un d'eux perçoit parfaitement le bruit de deux cailloux choqués par l'autre.

Pour prouver avec quelle facilité se fait cette transmission du son à travers les liquides, on place un vase V (fig. 325) plein de mercure sur une caisse sonore B qui peut renforcer le son d'un diapason A. On fait vibrer le diapason et on lui fait toucher la surface du mercure. Aussitôt la caisse sonore, ébranlée comme elle l'eût été si l'on avait posé directement le diapason sur elle, renforce le son produit par ce dernier.

466. **Mode de propagation du son.** — L'expérience suivante rend compte facilement du mode de propagation du son. Sept boules d'ivoire sont suspendues à une traverse en bois

(fig. 326) par des fils de même longueur et se touchent entre elles. Si l'on vient à éloigner l'une d'elles A de la verticale et qu'on l'a-

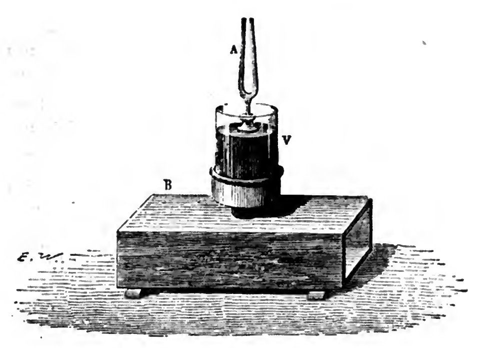



Fig. 325.

bandonne à elle-même lorsqu'elle sera arrivée en A', elle viendra frapper la seconde, et l'on verra la dernière boule B lancée en B', les autres restant en repos. Voici ce qui a eu lieu : la seconde bille s'est comprimée par le choc de A, puis revenant à son volume primitif, a réagi sur la suivante qui, après s'être aussi comprimée, a exercé sa réaction sur la quatrième et ainsi de suite jusqu'à B qui, poussée par le retour de l'avant-dernière boule à ses dimensions premières, s'est avancée jusqu'en B'.

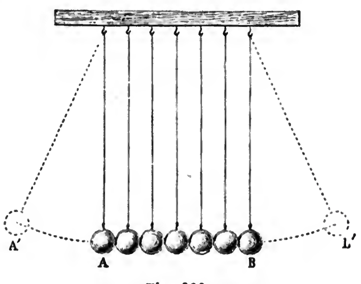



Fig. 326.

La transmission du mouvement vibratoire des corps sonores se fait de la même manière. Les molécules du corps sonore, en s'écartant de leur position d'équilibre, poussent devant elles la couche d'air qui les entoure ; celle-ci se comprime, augmente de force élastique, et réagit sur la couche suivante qui, se comprimant à

son tour, communique le mouvement à la troisième et ainsi de suite. Lorsque les molécules du corps sonore reviennent vers leur position d'équilibre, un mouvement en sens contraire se produit dans l'air. La couche d'air en contact avec les molécules vibrantes, pouvant se répandre dans l'espace abandonné par ces dernières, diminue de force élastique, la suivante se détend à son tour, et de proche en proche le mouvement se propage. Ce mouvement des couches d'air a lieu évidemment ici en sens contraire de tout à l'heure. Comme on peut répéter le même raisonnement pour chacune des vibrations du corps sonore, on voit que l'air se trouve alternativement animé de vitesses de sens contraires, qu'il est lui-même en vibration.

Ce raisonnement pourrait s'appliquer à tout autre milieu solide, liquide ou gazeux.

467. **Réflexion du son. Échos.** — Le mode de propagation du son a la plus grande analogie avec le phénomène qui se produit lorsqu'au milieu d'une nappe d'eau tranquille on laisse tomber un corps solide, une pierre, par exemple. Autour du point où la pierre a touché l'eau, un cercle se forme, puis un second, puis un troisième et ainsi de suite : tous ces cercles s'élargissent et semblent courir à la file l'un de l'autre, quoique, en réalité, il n'y ait que propagation d'un mouvement vibratoire. Or, lorsque ces ondes, excitées à la surface du liquide, rencontrent les bords du bassin, elles se réfléchissent et on les voit revenir sur elles-mêmes ou se propager dans une direction inclinée sur celle qu'elles avaient suivie pour aller toucher l'obstacle. La propagation du son qui se fait par ondes sonores, semblables aux ondes liquides dont nous venons de parler, donne lieu à des phénomènes tout à fait analogues, produisant ce que l'on désigne ordinairement sous le nom d'*écho*.

On appelle *écho* la répétition d'un son réfléchi par un obstacle qui est assez éloigné pour que le son réfléchi ne se confonde pas avec le son entendu directement. On dit qu'un écho est *monosyllabique,* quand on ne peut prononcer qu'une syllabe avant que le son réfléchi de cette syllabe revienne à l'oreille. Il est *polysyllabique* quand on peut prononcer plusieurs syllabes, avant que le son de la première revienne à l'oreille. Cela dépend évidemment de la distance où l'on se trouve de l'obstacle réfléchissant.

Quand on est assez près de cet obstacle pour que le son réflé-

chi revienne, alors que la sensation produite par le son primitif dure encore, il y a confusion des deux impressions, et on dit alors qu'il y a renforcement du son, qu'il y a *résonnance*. C'est ce qui arrive dans les appartements non tapissés. Les tentures empêchent les résonnances et rendent un espace *sourd*, parce que la réflexion du son ne peut se faire à leur surface.

Il y a des échos *multiples* qui répètent plusieurs fois le même son, par suite de l'existence de plusieurs obstacles qui se renvoient mutuellement les ondes sonores. A mesure que le nombre des réflexions augmente, le son diminue d'intensité et finit par s'éteindre.

Gassendi cite un écho situé près du tombeau de Métella, et qui répète huit fois un vers de l'*Énéide*. Un écho observé au château de Simonetta, en Italie, répète quarante à cinquante fois le bruit d'un coup de pistolet. A trois lieues de Verdun, on trouve un écho qui répète un son douze ou treize fois.

Nous citerons comme application de la réflexion du son le phénomène observé dans certaines salles, auxquelles on a donné la forme ellipsoïdale. Quelques paroles prononcées à voix basse, en un point de l'ellipsoïde appelé foyer, s'entendent distinctement à l'autre foyer, quoiqu'on ne puisse les entendre en aucun autre point, même plus rapproché de celui où le son a été produit. Il y a au bas du grand escalier du Conservatoire des arts et métiers, à Paris, une salle dont les angles opposés offrent la même particularité.

On peut ici citer encore une expérience analogue à celle que nous avons décrite (242) à propos de la réflexion de la chaleur. Les deux miroirs courbes, dont nous avons parlé, étant disposés comme nous l'avons indiqué, on place au foyer de l'un d'eux une montre, et, si l'on met l'oreille au foyer de l'autre, on perçoit très-distinctement le tictac de la montre que l'on ne peut entendre en un point intermédiaire.

L'usage des porte-voix et des cornets acoustiques est aussi fondé sur la réflexion du son.

468. **Vitesse du son.** — « Lorsque nous voyons, dit Mersenne, un bûcheron abattre du bois à une distance un peu considérable, nous reconnaissons immédiatement que le bruit de chaque coup de hache met un temps sensible pour arriver à notre oreille; de même encore, lorsque nous observons de loin

l'explosion d'une pièce de canon, nous apercevons la lumière avant d'entendre le bruit. »

De même encore il s'écoule toujours un intervalle de temps plus ou moins long entre l'instant où nous voyons l'éclair et celui où nous entendons le bruit du tonnerre, intervalle qui peut servir à calculer la distance à laquelle se trouvent les nuages orageux. Plus il est grand, plus ces nuages sont éloignés.

La propagation du son n'est pas instantanée. Les premières expériences faites pour mesurer la vitesse du son dans l'air furent exécutées en 1738 aux environs de Paris, entre Montmartre et Montlhéry, par une commission de l'Académie des sciences. Elles établirent que le mouvement de propagation est uniforme, c'est-à-dire qu'en temps égaux le son parcourt des espaces égaux.

Il résulte de là que la vitesse du son dans l'air doit être définie par la distance que le son parcourt dans ce milieu pendant l'unité de temps.

La détermination de cette vitesse repose sur le principe suivant : Lorsqu'à une petite distance nous voyons se produire un phénomène lumineux, celui qui accompagne la détonation d'une arme à feu, par exemple, nous pouvons, vu la vitesse considérable de la lumière (77 000 lieues par seconde), regarder l'instant de la perception de ce phénomène par notre œil comme coïncidant avec celui où il a été produit. Si le phénomène lumineux est accompagné d'un son, nous pouvons considérer l'intervalle, qui sépare l'instant de la sensation perçue par l'œil de celui où le son arrive à l'oreille, comme sensiblement égal à celui que le son a mis pour arriver jusqu'à nous : si nous connaissons d'ailleurs la distance exprimée en mètres qui nous sépare du lieu où a été produit le son, en divisant cette distance par le temps observé exprimé en secondes, nous aurons l'espace parcouru en une seconde et par suite la vitesse du son.

C'est sur ce principe que s'appuyèrent Prony, Arago, de Humboldt, Gay-Lussac, Bouvier et M. Mathieu dans les expériences qu'ils firent en 1822 pour déterminer la vitesse du son dans l'air. Ces observateurs se divisèrent en deux groupes dont l'un se plaça sur les hauteurs de Villejuif, l'autre à côté de la tour de Montlhéry, stations distantes de 18 613 mètres. A une heure fixée d'avance, le feu était mis à une pièce de canon sur les hau-

teurs de Villejuif : les observateurs de Montlhéry notaient, à l'aide de chronomètres, l'instant où ils apercevaient l'inflammation de la poudre, puis notaient l'instant où le son parvenait à leur oreille. Au bout de cinq minutes, un coup de canon était tiré à Montlhéry et les observateurs de Villejuif faisaient à leur tour les mêmes déterminations. La moyenne des temps observés fut de 54",6, à 16°, température de l'expérience. Il est évident que, si le son mettait 54",6 pour parcourir 18 613 mètres, en une seconde il parcourrait 54,6 fois moins, ou 18 613 divisé par 54,6, c'est-à-dire 340 mètres. On admit donc que dans l'air et à 16° la vitesse du son était de 340 mètres.

La température influe sur la vitesse de propagation du son : quand elle s'abaisse, la vitesse diminue ; à 0° elle n'est que de 333 mètres. L'influence du vent, que les expérimentateurs dont nous venons de parler avaient voulu éviter par l'alternance de leurs observations, est d'augmenter la vitesse des sons qui suivent la même route que lui et de diminuer la vitesse de ceux qui marchent en sens inverse. Mais la rapidité de la transmission du son étant très grande par rapport à celle des vents les plus violents, l'influence des vents sur la vitesse du son peut être regardée comme négligeable dans la plupart des cas.

La vitesse du son varie avec la nature du gaz au milieu duquel se fait la propagation.

Dans l'eau, cette vitesse que MM. Colladon et Sturm ont déterminée par des procédés analogues, sur le lac de Genève, est de 1 425 mètres.

Biot a montré que dans la fonte elle était dix fois plus grande que dans l'air.

---

# CHAPITRE III

## QUALITÉS DU SON. — INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME. INSTRUMENTS DE MUSIQUE.

469. Les sons se distinguent les uns des autres par trois caractères ou qualités que l'on appelle *intensité, hauteur* et *timbre.*

470. **Intensité.** — L'intensité du son dépend principalement : 1° de l'*amplitude des vibrations* du corps sonore. Plus cette amplitude est considérable, plus l'intensité du son est grande. Quand on écarte de sa position d'équilibre une corde tendue, pour l'y laisser revenir par une série de vibrations, on constate que le son qu'elle rend est d'autant plus intense qu'on l'a écartée davantage, et qu'il s'affaiblit à mesure que l'anplitude des vibrations diminue ;

2° De la *densité du milieu* dans lequel le son prend naissance. Lorsque, toutes choses égales d'ailleurs, la densité du milieu diminue, l'intensité décroît avec elle. Un coup de fusil tiré sur le sommet d'une haute montage donne lieu à un bruit moins intense que si, avec la même charge de poudre, il était tiré en plaine. Cela tient à ce que la densité de l'air devient plus faible à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère ;

3° De la *distance* à laquelle on se trouve du lieu où a été produit le son. Plus on est éloigné, plus le son perçu est faible.

Des expériences aérostatiques faites récemment prouvent que l'intensité des sons émis à la surface de la terre se propage sans s'éteindre jusqu'à de grandes hauteurs dans l'atmosphère.

| | |
|---|---|
| Le sifflet d'une locomotive s'entend à une hauteur de. | 3000m |
| Le bruit d'un train de chemin de fer..... ......... | 2500 |
| Les cris d'une population........................ | 1600 |
| Le chant du coq, le son d'une cloche............... | 1600 |
| La voix humaine.................................. | 1000 |
| Le bruit d'un ruisseau............................ | 1000 |

La transmission de haut en bas ne se fait qu'avec plus de difficulté : à plus de 100 mètres on n'entend plus la voix humaine.

Les nuages n'opposent pas d'obstacle à la transmission des sons.

4° De la *direction du vent.* Tout le monde sait que certains sons, celui des horloges ou des cloches, s'entendent par certains vents à une distance déterminée, tandis que par d'autres on ne les entend plus.

471. **Hauteur du son, gravité, acuïté.** — On sait que les sons diffèrent les uns des autres par leur gravité, leur acuïté, leur hauteur. Ainsi le son rendu par une sonnette d'appartement est plus aigu, plus élevé que celui de la cloche d'un beffroi; les différentes notes d'un piano se distinguent par leur hauteur.

On a reconnu que les sons sont d'autant plus aigus que le mouvement vibratoire des corps qui les produit est plus rapide, en d'autres termes que le nombre de vibrations exécutées en un temps donné est plus grand.

472. **Mesure du nombre de vibrations correspondant à un son donné.** — Les physiciens emploient plusieurs méthodes pour mesurer le nombre de vibrations correspondant à un son donnné. Nous ne décrirons que celles qui reposent sur des méthodes graphiques et qui sont les plus simples, en ne citant que pour mémoire les méthodes de la roue dentée de Savart et de la sirène de Cagnard-Latour.

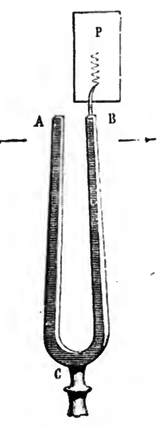


Fig. 327.

**Méthode graphique.** — La méthode graphique consiste à faire inscrire par le corps vibrant lui-même les vibrations qu'il exécute. Supposons qu'on veuille déterminer le nombre des vibrations exécutées en un temps donné par un corps sonore, on ajuste un diapason qui rende exactement le même son. On arme une de ses branches d'une pointe fine, comme le représente la figure 327, et on fait passer devant elle, au contact, et dans une direction perpendiculaire à celle des vibrations, une plaque de verre P recouverte de noir de fumée ou de collodion. La pointe trace alors des zigzags sur la plaque. Il est facile de se rendre compte de la production de ces zigzags. Si la plaque glissait parallèlement aux flèches de

la figure, la pointe tracerait à sa surface une série de petites lignes droites superposées ; mais comme elle se déplace dans une direction perpendiculaire, la pointe se trouve à chaque instant à une hauteur différente par rapport au bord inférieur de la plaque, et décrit des lignes inclinées dont la succession donne lieu aux zigzags. Chacun d'eux correspond à une vibration complète, puisque chaque petite ligne correspond elle-même à une demi-vibration ; en comptant alors à la loupe le nombre de zigzags exécutés dans un temps donné, on connaît le nombre de vibrations faites par le diapason dans le même temps.

Pour opérer avec précision, il est nécessaire que la plaque se meuve d'un mouvement uniforme ; aussi la remplace-t-on souvent par une roue que met en mouvement un appareil d'horlogerie ; la tranche de cette roue est recouverte de noir de fumée et reçoit le tracé des vibrations (fig. 328).

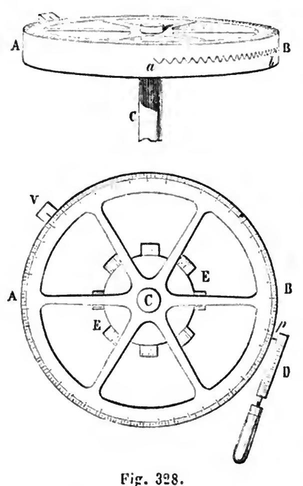



Fig. 328.

**473. Intervalles musicaux ; gamme.** — Lorsqu'on produit à la fois deux sons différents, cette superposition nous impressionne d'une manière agréable ou pénible. Dans le premier cas, les deux sons forment un *accord consonnant* ou une *consonnance*, dans le cas contraire une *dissonance* ou *cacophonie*.

Il existe un assez grand nombre d'accords différents dont la musique s'est emparée pour produire des effets agréables à l'oreille ; les physiciens ont recherché quelles relations doivent exister entre les nombres de vibrations de deux notes pour produire tel ou tel accord.

La musique a adopté une échelle de sons qui permettent de réaliser tous les accords consonnants. Cette échelle, appelée *gamme*, comprend sept notes dont voici les nombres de vibrations comparés à celui de la première :

| *ut* | *ré* | *mi* | *fa* | *sol* | *la* | *si* | *ut*. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $\frac{9}{8}$ | $\frac{5}{4}$ | $\frac{4}{3}$ | $\frac{3}{2}$ | $\frac{5}{3}$ | $\frac{15}{8}$ | 2. |

Si on commence la gamme par une note telle que le nombre de vibrations effectuées par seconde soit de 522, on aura pour les nombres de vibrations correspondants aux autres notes :

| *ut* | *ré* | *mi* | *fa* | *sol* | *la* | *si* | *ut* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 522 | $522 \times \frac{9}{8}$ | $522 \times \frac{5}{4}$ | $522 \times \frac{4}{3}$ | $522 \times \frac{3}{2}$ | $522 \times \frac{5}{3}$ | $522 \times \frac{15}{8}$ | $522 \times 2$. |

474. **La normale.** — Nous venons de commencer la gamme par une note qui donne 522 vibrations par seconde ; nous aurions pu la commencer par toute autre note, et la continuer de manière que le nombre de vibrations des différentes notes eussent entre eux les rapports que nous venons d'indiquer. La gamme reste la même au fond, qu'elle soit chantée par une voix grave ou aiguë. Quoi qu'il en soit, il est nécessaire d'avoir un point de départ commun et de fixer ce que nous appelons la *gamme normale*.

Dans ces derniers temps, une commission nommée par M. le ministre d'État a fixé le *la* normal à un nombre de 870 vibrations par seconde. On remarquera que, dans l'exemple que nous avons choisi plus haut, le *la* a justement ce nombre de vibrations, puisque les $\frac{5}{3}$ de 522 sont égaux à 870.

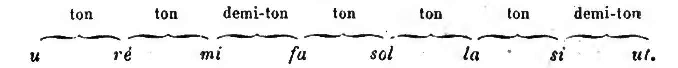
475. **Notations des diverses gammes naturelles.** — On représente ordinairement par $ut_1$ l'*ut* le plus grave de la basse, par $ut_2$ celui qui le suit en montant et qui correspond à un nombre double de vibrations, par $ut_3$ celui qui suit $ut_2$, etc. Le *la* normal dont nous venons de parler appartient à la gamme qui commence par $ut_3$, ce qui donne 522 vibrations pour $ut^3$, $\frac{522}{2}$ ou 261 pour $ut_2$, $\frac{261}{2}$ ou 130,5 pour $ut_1$, qui est l'*ut* grave du violoncelle.

Enfin, en musique, en emploie encore les notes plus graves $ut_{-1}$ et $ut_{-2}$, cette dernière étant la plus grave des notes usitées et correspondant à 32 vibrations.

476. **Accord parfait.** — Les notes qui, produites ensemble ou à un court intervalle de temps, font sur l'oreille la sensation la plus agréable sont *ut*, *mi*, *sol*, qui correspondent à des nombres de vibrations 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$, ou se multipliant par 4 : 4, 5, 6.

Leur ensemble est désigné sous le nom d'*accord parfait majeur*.

477. **Tons, demi-tons.** — Si nous comparons entre elles les notes de la gamme, en prenant le rapport de chacune d'elles à la précédente, nous ne trouvons que les fractions $\frac{9}{8}$, appelée ton majeur, $\frac{10}{9}$, appelée ton mineur, et $\frac{16}{15}$, appelée demi-ton majeur, si bien que la gamme peut être considérée comme composée de deux tons, un demi-ton, trois tons, un demi-ton :




478. **Dièzes et bémols.**— Les besoins de la musique exigent souvent un plus grand nombre de notes que celles qui se trouvent dans la gamme. Quand on veut transposer une mélodie musicale, c'est-à-dire écrire en prenant pour point de départ de la gamme ou comme tonique une note plus grave ou plus basse que celle qui a été choisie par le compositeur, il faudra évidemment que dans la nouvelle gamme les tons et demi-tons se succèdent dans le même ordre pour que *l'air* ne soit pas changé. Or, ceci n'est pas toujours réalisable avec les sept intervalles ordinaires. On est convenu alors de diézer ou de bémoliser certaines notes. *Diézer* une note, c'est multiplier le nombre qui la représente par $\frac{25}{24}$. Ainsi le *fa* de la gamme naturelle correspondant à 696 vibrations, *fa* dièze correspondra à 696 multiplié par $\frac{25}{24}$ ou 725 vibrations. *Bémoliser* une note, c'est multiplier le nombre qui la représente par $\frac{24}{25}$; *si* correspond à 978,75 vibrations, *si* bémol correspondra à 978,75 multiplié par $\frac{24}{25}$ ou 939,6 vibrations.

479. **Timbre des sons.** —Les sons se distinguent aussi les uns des autres par une qualité que l'on appelle timbre. On peut tirer d'un cor, d'un violon, d'une flûte, d'un hautbois, d'un piano, des sons identiques pour la hauteur, mais complétement différents au point de vue de leur timbre.

M. Helmholtz a, dans ces derniers temps, publié de remarquables travaux sur le timbre des sons. Il a prouvé qu'en général lorsqu'un instrument de musique rend un son, indépendamment du son principal qui en détermine la hauteur, il se produit en même temps d'autres sons accessoires qui se superposent à lui. Ces sons accessoires varient suivant les cas de nature et d'intensité, et c'est ce qui explique pourquoi plusieurs instruments rendant successivement un son de même hauteur, on en distingue par-

faitement le timbre : indépendamment du son principal qui a déterminé la hauteur du son, il s'en est produit d'autres, accessoires et variables d'un instrument à l'autre, qui, par leur superposition avec le son principal, ont fait varier la nature de l'impression produite sur l'organe de l'ouïe.

Nous ne décrirons pas les expériences si élégantes et si précises par lesquelles M. Helmholtz est arrivé à établir la théorie précédente.

## INSTRUMENTS DE MUSIQUE.

480. L'emploi des instruments de musique est basé sur un certain nombre de lois que nous n'étudierons que d'une manière superficielle, et seulement pour faire comprende l'usage des principaux instruments.

481. **Vibrations des cordes. — Instruments à cordes. —** Une corde tendue peut vibrer de deux manières, transversalement ou longitudinalement. Les vibrations transversales, les seules dont on fasse usage, s'obtiennent en écartant la corde de la ligne droite, en la frappant, en la pinçant ou en la frottant perpendiculairement à sa longueur avec un archet. Les vibrations des cordes du violon, du violoncelle, de la contre-basse, de la harpe, du piano, sont des vibrations transversales.

Le nombre de vibrations exécutées dans l'unité de temps par une corde métallique homogène tendue dépend de sa longueur, c'est-à-dire de la distance qui existe entre ses extrémités fixes, de son diamètre, de la force qui la tend, et enfin de la densité de la substance de la corde. Il diminue lorsque la longueur, le diamètre ou la densité augmentent, lorsque la tension diminue.

On peut faire rendre à une corde les différentes notes de la gamme en lui donnant les longueurs, 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, $\frac{1}{2}$, qui sont les rapports inverses de ceux qui expriment les notes de la gamme. Ainsi une corde de longueur $\frac{1}{2}$ rend l'octave aiguë du son rendu par elle lorsque sa longueur est 1.

Dans le piano, la harpe, les cordes sont d'autant plus longues et plus grosses qu'elles ont à produire un son plus grave. Dans les pianos droits, on emploie même pour l'octave la plus grave des cordes de platine, substance très-dense, afin d'éviter de leur

donner une trop grande longueur ou un trop grand diamètre qui augmenterait trop leur rigidité.

Dans le violon, la basse, la contre-basse, les quatre cordes ont la même longueur, mais, leur diamètre va, en décroissant, à partir de la corde qui donne le son le plus grave. Dans ces instruments on fait varier la tension des cordes, à l'aide de petits treuils situés à l'extrémité du manche de l'instrument. Tout le monde sait qu'un violoniste accorde son violon en faisant tourner les petits treuils dans un sens ou dans l'autre. En posant ensuite les doigts de la main gauche en différents points des cordes, il diminue ou augmente la distance des points fixes, par suite la longueur de la corde, et augmente le nombre des sons que peuvent rendre les quatre cordes lorsqu'on leur laisse leur longueur totale.

Dans tous ces instruments les cordes sont tendues au-dessus d'une boîte dont l'air se met en vibration sous l'influence des vibrations des cordes, et le son, qui sans cette boîte serait trop faible, se trouve notablement renforcé.

482. **Tuyaux sonores.** — Les vibrations des corps solides ne sont pas seules capables de produire des sons. L'usage d'un certain nombre d'instruments de musique repose sur la mise en vibration de la colonne d'air qu'ils renferment.

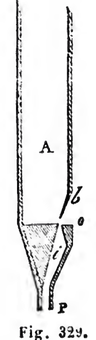


Fig. 329.

Les orgues sont des instruments composés de tuyaux sonores.

On distingue deux sortes de tuyaux sonores : 1° les tuyaux à embouchure de flûte; 2° les tuyaux à anches.

483. **Tuyaux à embouchure de flûte.** — La figure 329 représente la coupe d'un tuyau à embouchure de flûte. A est la cavité du tuyau qui est prismatique ou cylindrique : P est le pied qui donne entrée au courant d'air lancé par un soufflet. Dans sa partie inférieure le tuyau est réduit à un canal *i* qui se termine par une fente laissant sortir le courant et qu'on nomme *lumière*. L'air, en sortant, va frapper un biseau *b* et s'échappe par l'ouverture *ab* qu'on appelle *bouche*. Il résulte des chocs de l'air contre le biseau que cet air se met en vibration, que ses vibrations se communiquent à l'air renfermé dans le tuyau et le font résonner.

484. **Tuyaux à anches.** — Souvent, pour mettre en vibration l'air d'un tuyau, on se sert d'anches, ou lames élastiques que l'air soulève, qui retombent par leur élasticité et qui permettent ou interrompent le passage du gaz. Un tuyau à anches se compose en général de trois parties, du porte-vent B (fig. 330), de l'anche *o* et du cône A. Le cône peut être supprimé, mais il donne beaucoup d'éclat au son.

L'anche est une sorte de soupape *l* que l'on place à la partie supérieure du porte-vent. Les trois parties essentielles de l'anche sont : la *rigole*, ou canal par lequel s'échappe l'air ; la *languette l*, ou petite lame de cuivre qui, fixée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, vibre sous l'influence du courant d'air; la *rasette rr*, ou tige de cuivre que l'on descend à volonté et qui, pressant sur la languette, la raccourcit ou l'allonge.

La rasette permet d'accorder facilement le tuyau en faisant varier le son qu'il produit.

Lorsque la languette est plus large que la rigole et bat sur ses bords, on dit que l'anche est *battante*. Souvent l'anche est plus petite que la rigole et (fig. 331) bat dans son intérieur, on dit alors que l'anche est *libre*.

Dans la figure 331 on voit un cône A d'une forme différente de celui de la figure 330.

Fig. 331.

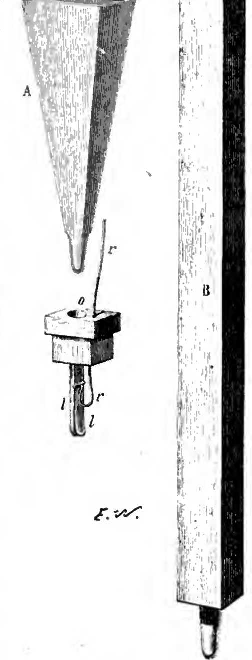



Fig. 330.

485. Comme l'embouchure adaptée aux tuyaux ne sert qu'à mettre l'air en vibration, la nature de cette embouchure n'a pas d'influence sur la hauteur du son ; elle ne fait qu'en modifier le timbre. Les lois suivantes dues à Bernouilli et trouvées

par lui sur des tuyaux longs, étroits et rectilignes, sont applicables à tous les instruments à vent.

On peut faire rendre à un même tuyau différents sons en variant la vitesse du courant d'air injecté ; le plus grave de tous ces sons est appelé le *son fondamental*, les autres sont appelés *harmoniques*.

1° *Pour des tuyaux de même espèce, les nombres de vibrations qui correspondent au son fondamental varient en raison inverse des longueurs de ces tuyaux;* c'est-à-dire qu'un tuyau de longueur déterminée donne l'octave aiguë du tuyau de longueur double.

Ainsi, pour obtenir toutes les notes de la gamme, il faut employer une série de tuyaux de même espèce dont les longueurs soient représentées par 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{35}$, $\frac{3}{2}$.

2° *Le son fondamental d'un tuyau fermé à sa partie supérieure est toujours l'octave grave de celui du tuyau ouvert de même longueur.* C'est pour cela que dans les orgues on substitue quelquefois le *bourdon* ou tuyau fermé de 5 mètres de longueur au tuyau ouvert de 10 mètres.

3° Les nombres de vibrations, correspondant aux harmoniques d'un tuyau ouvert, sont entre eux comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, et pour un tuyau fermé comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc.

486. Dans la colonne d'air en vibration d'un tuyau sonore, il existe en certains points des tranches d'air, appelées *nœuds*, perpendiculaires à la longueur du tuyau et qui demeurent immobiles pendant tout le temps que le tuyau rend le même son. La distance de deux nœuds consécutifs est divisée en deux parties égales par des régions appelées *ventres* où la vitesse de l'air est maximum. Lorsqu'on pratique une ouverture sur la paroi d'un tuyau, le son n'est pas changé, quand elle est pratiquée à l'endroit d'un ventre; il varie lorsqu'elle est pratiquée à l'endroit d'un nœud.

487. **Instruments à vent.** — Dans les instruments à vent, l'air est tantôt ébranlé par une embouchure de flûte, tantôt par une anche.

488. **Instruments à embouchure de flûte.** — Parmi ces instruments, nous citerons la flûte traversière, le fifre, la flûte de Pan, le flageolet. Dans la flûte l'air est lancé dans une direction transversale à la longueur de l'instrument. Cette circonstance

influe sur la qualité du son. Quand tous les trous de la flûte sont bouchés, on obtient, comme dans les tuyaux ouverts, les harmoniques du son fondamental en faisant varier la vitesse du courant d'air et la distance des lèvres au bord du trou qui sert de biseau. Pour obtenir les sons intermédiaires entre les harmoniques, on ouvre des trous pratiqués en dehors des ventres.

Dans le flageolet, l'embouchure est faite comme celle du tuyau d'orgue.

489. **Instruments à anches.** — On peut les diviser en instruments à anches proprement dits ou *à bec* et en instruments à *bocal*. Parmi les premiers nous citerons la *clarinette*, le *hautbois*, le *basson*. Tous ces instruments ont des trous, qui, ouverts ou fermés par les doigts ou par des clefs, servent, comme dans la flûte, à modifier la hauteur des sons rendus. Dans la clarinette l'anche est formée d'une lame de roseau que l'on fait vibrer par le souffle. On fait varier le ton en limitant plus ou moins par la pression des lèvres la longueur de la partie vibrante : les lèvres jouent alors le rôle de la rasette dans les tuyaux d'orgue. Dans le hautbois et le basson, le bec est formé de deux lames minces et élastiques entre lesquelles on souffle, et que les lèvres pressent en des points plus ou moins voisins de l'extrémité libre.

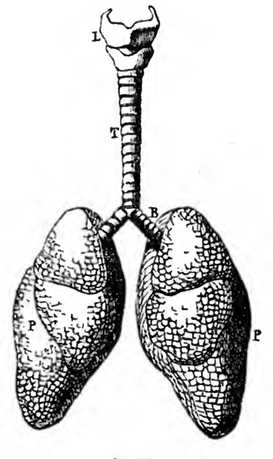
Parmi les instruments à bocal, nous citerons le *cor*, la *trompette*, le *clairon*, le *trombone*, l'*ophicléide*, le *cornet à pistons*, la *trompette à pistons*. Dans tous ces instruments ce sont les lèvres de l'exécutant qui jouent le rôle d'anche double, à tension variable au gré du musicien. Elles vibrent dans une cavité qui se trouve à l'entrée de l'instrument et qu'on appelle l'*embouchure*. La colonne d'air vibre à l'unisson des lèvres. Le tube ordinairement en laiton s'élargit de plus en plus et se termine par une partie qui s'évase brusquement et qu'on nomme le *pavillon*. Dans le cor, qui donne les harmoniques d'un tuyau ouvert, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, etc , on modifie les sons en obstruant plus ou moins avec la main l'ouverture du pavillon.

Dans le trombone, on allonge et on raccourcit le tuyau au moyen d'un tirage qui glisse dans l'instrument. Dans le cornet à pistons, dans la trompette à pistons, le jeu des pistons a pour effet d'introduire dans la colonne d'air courbe des longueurs supplémentaires qui modifient la hauteur des sons.

490. **De la voix.** — L'appareil vocal de l'homme se compose

de plusieurs parties : les poumons qui fournissent le vent, la trachée-artère qui l'amène dans le larynx, le larynx où se forme le son, l'arrière-bouche et la bouche qui renforcent le son produit.

Les poumons se voient en P (fig. 332). Ce sont des organes spongieux divisés en une infinité de petites cellules dont chacune communique avec une division d'un tube T appelé trachée-artère, qui entrant en B dans les poumons s'y ramifie. La trachée-artère est composée d'une série d'anneaux élastiques superposés. Elle vient aboutir dans l'arrière-bouche. C'est par elle que l'air



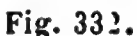



Fig. 332.

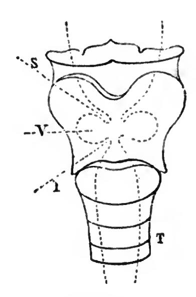



Fig. 333.

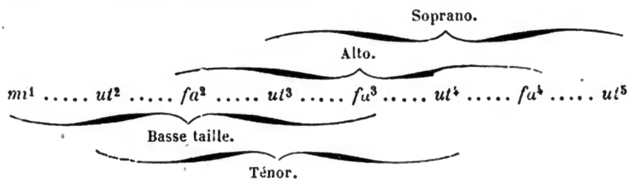
nécessaire à la respiration entre dans les poumons, c'est par elle aussi que cet air, après avoir exercé sur le sang son action vivifiante, sort vicié, pour être rejeté au dehors en passant par la bouche et par les fosses nasales.

La trachée-artère en arrivant au larynx L se rétrécit brusquement en forme de fente étroite comprise entre deux lamelles élastiques appelées *cordes vocales inférieures* I (fig. 333). Cette fente peut être comparée à une boutonnière dont les deux bords forment les cordes vocales. Le larynx s'élargit ensuite et présente deux renflements V appelés *ventricules* du larynx. Un nouveau

rétrécissement se trouve au-dessus des ventricules et forme les cordes vocales supérieures S; immédiatement après, le larynx communique avec l'arrière-bouche.

Les sons de la voix sont produits par les cordes vocales mises en vibration par le courant d'air venant des poumons qui jouent le rôle de soufflet, sont renforcés par les ventricules, et, lorsqu'ils arrivent dans la bouche, sont articulés par le jeu de la langue et des lèvres, qui les divisent en syllabes et produisent la parole.

491. **Étendue de la voix humaine.** — La voix d'un même individu embrasse généralement deux à trois octaves. Mais la hauteur des sons varie suivant les individus. Voici, d'après M. Muller, le tableau des intervalles que peuvent parcourir les voix de diverses hauteurs en prenant pour ut[1] l'ut grave du violoncelle ou 130,5 vibrations par seconde.




Les voix de basse-taille et de ténor appartiennent aux hommes et celle d'alto et de soprano aux femmes et aux enfants. La voix de baryton est intermédiaire entre celle de ténor et celle de basse-taille. Quelques voix exceptionnelles sortent des limites extrêmes que nous venons d'indiquer.

492. **De l'oreille ou organe de l'ouïe.** — Il nous reste maintenant, pour terminer l'étude des parties principales de l'acoustique, à décrire l'organe que la nature nous a donné pour recueillir les sons, qui deviennent alors la cause d'impressions transmises au cerveau et appréciées par lui. Cet organe est désigné sous le nom d'organe de l'ouïe ou de l'audition : il est double et placé de chaque côté de la tête.

Chez l'homme et tous les mammifères, il est composé de trois chambres distinctes et successives, l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

L'oreille externe se compose du *pavillon* P (fig. 334) et du *conduit auditif* A. Le pavillon P est une lame composée de fibres et

de cartilages, irrégulièrement contournée et dont les replis servent à réfléchir les ondes sonores dans le conduit auditif. On y remarque une espèce d'entonnoir arrondi C, appelé *conque auditive.* Le pavillon, dans le langage ordinaire, est désigné sous le nom d'oreille. Les ondes sonores réfléchies par les replis du pavillon entrent dans le conduit A et viennent frapper une membrane T tendue obliquement à l'extrémité de ce conduit et servant à le séparer de l'oreille moyenne. Cette membrane est appelée *tympan.* Derrière le tympan vient l'oreille moyenne, sorte de caisse creusée dans la partie la plus dure de l'os temporal R, appelé *rocher.* On y remarque deux ouvertures appelées *fenêtre ovale* et

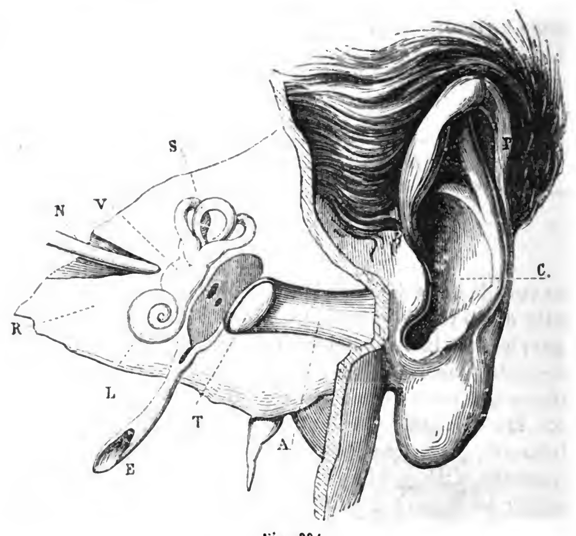



Fig. 334.

*fenêtre ronde* à cause de leur forme : ces ouvertures sont fermées par des membranes. Une autre ouverture fait communiquer l'oreille moyenne par un conduit E appelé *trompe d'Eustache* avec l'arrière-bouche, de sorte que l'air contenu dans l'oreille moyenne est toujours à la pression atmosphérique. Dans l'oreille moyenne une chaîne d'osselets appelés *marteau, m* (fig. 335), *enclume, e, os*

*lenticulaire*, *l*, *étrier*, *é*, relie les membranes du tympan et de la fenêtre ovale sur lesquelles elle s'appuie.

L'*oreille interne* est une cavité irrégulière où vient se rendre le nerf acoustique N chargé de transmettre au cerveau les impressions qu'il reçoit. Il se distribue dans des appareils osseux à l'extérieur, membraneux à l'intérieur. Les différentes parties de l'oreille interne sont le vestibule V (fig. 334), sac de forme ovoïde irrégulière présentant deux ouvertures communiquant avec les fenêtres ovale et ronde. Sur la paroi supérieure du vestibule sont adaptés trois tubes courbes S appelés *canaux semi-circulaires*, et sur la partie inférieure s'adapte un organe L appelé *limaçon*, à cause de sa forme. Toute l'oreille interne est remplie de liquide au milieu duquel flottent les fibrilles du nerf acoustique.

Fig. 335.

Ceci posé, voyons comment les sons se transmettent à l'oreille interne et y sont perçus par le nerf acoustique.

Les ondes sonores réfléchies par le pavillon entrent dans le conduit auditif, et viennent frapper la membrane du tympan qu'elles mettent en vibration. Les vibrations sont transmises alors par la chaîne des osselets et par l'air renfermé dans l'oreille moyenne aux membranes des fenêtres ovale et ronde, qui, vibrant elles-mêmes, font vibrer le liquide de l'oreille interne. L'ébranlement communiqué au nerf acoustique produit alors la sensation du son.

# LIVRE CINQUIÈME

## OPTIQUE

---

## CHAPITRE PREMIER

### LUMIÈRE. — SA PROPAGATION. — OMBRES. — CHAMBRE OBSCURE. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

493. La lumière est l'agent qui établit une communication entre notre œil et les objets extérieurs et nous les rend visibles. L'optique est la partie de la physique qui s'occupe de l'étude des phénomènes lumineux. Nous ne savons rien sur la nature même de la lumière, et les physiciens en sont réduits à des hypothèses expliquant les faits observés ; nous n'exposerons pas ces hypothèses et nous nous bornerons à décrire au point de vue purement expérimental les principaux phénomènes lumineux.

494. Parmi les corps de la nature, les uns sont lumineux par eux-mêmes (soleil, étoiles, flamme de bougie, etc.), les autres ne le sont pas, mais deviennent visibles pour nous en nous renvoyant la lumière qu'ils reçoivent des premiers.

Les corps non lumineux par eux-mêmes se subdivisent en quatre groupes : 1° les corps *opaques,* qui sont imperméables à la lumière ; 2° les corps *diaphanes* ou *transparents incolores,* qui se laissent traverser par la lumière et au travers desquels on distingue nettement la couleur, la forme des objets (air, verre poli) ; 3° les corps *transparents colorés,* qui donnent une teinte parti-

culière à la lumière qui les traverse (verres colorés, dissolutions colorées) ; 4° enfin les corps *translucides*, qui, n'ayant qu'une demi-transparence, laissent passer la lumière à travers eux, mais ne permettent pas de distinguer les formes... (papier huilé, verre dépoli).

495. **La lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène.** — La lumière se transmet d'un point à un autre, dans un milieu homogène, en suivant la ligne qui joint ces deux points, au moins tant qu'elle ne rencontre pas de corps étrangers qui la fassent dévier de sa route. Supposons l'œil placé à une certaine distance d'un point lumineux, il en résultera une sensation lumineuse, qui cessera dès qu'on interposera un écran en un point quelconque de la ligne droite qui joint le centre de l'œil à la source de lumière; l'écran placé en tout autre point, en dehors de cette ligne droite, n'empêchera pas la lumière d'arriver à l'œil.

L'expérience suivante peut encore démontrer le principe que nous occupe. Laissons entrer la lumière du soleil dans une chambre obscure par un trou étroit pratiqué dans l'un des volets; grâce aux corpuscules qui flottent dans l'air et que la lumière solaire éclaire sur son passage, on distingue très-nettement la route suivie. La ligne tracée est toujours une ligne droite.

On appelle *rayon lumineux* la ligne droite que suit la lumière en se propageant dans un milieu homogène.

496. **Ombre. — Pénombre.** — Quand un corps opaque est placé sur le trajet des rayons lumineux, il les arrête dans leur marche, et derrière lui se produit une ombre, c'est-à-dire que les corps qui le suivent, et qui sans lui recevraient les rayons de la source lumineuse, en sont privés et restent dans l'obscurité. Suivant que la source lumineuse se réduit à un point ou possède des dimensions finies, les phénomènes sont différents.

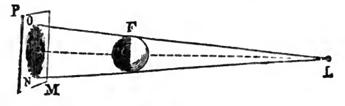


Fig. 336.

Supposons d'abord le premier cas. Le point lumineux L (fig. 336) envoie des rayons dans tous les sens; si l'on vient à placer un corps opaque F entre lui et l'écran PM, ce dernier, qui auparavant était complétement éclairé, reste obscur dans la partie ON

qui est dite l'ombre projetée par le corps F. On voit que si on suppose le corps F enveloppé par les rayons lumineux, on obtiendra un cône dont le sommet sera en L, qui sera lumineux dans toute la partie située à droite de F, obscure dans la partie située à gauche. C'est l'intersection de ce cône avec l'écran PM qui détermine l'ombre. Dans le cas que nous venons d'examiner, les limites de l'ombre sont parfaitement définies; il y a obscurité complète en ON, éclairement partout ailleurs sur l'écran.

Mais si la source lumineuse a des dimensions finies, comme on le voit en LB (fig. 337), les phénomènes sont différents. Il faut alors appliquer à chacun des points, qui peuvent encore envoyer de la lumière sur PM, les raisonnements faits dans ce qui précède sur le point L. Pour simplifier, ne nous occupons que des points extrêmes L et B. Chacun d'eux envoie un cône de rayons enveloppant le corps FE; ces deux cônes déterminent sur l'écran, par leur intersection avec lui, une région obscure dans la partie qui leur est commune, c'est l'*ombre*; une région grise sur les limites, c'est la *pénombre*. Dans la partie centrale, il n'arrive, comme on le voit, aucun rayon lumineux; mais la partie annulaire qui l'entoure, quoique moins éclairée que les parties de l'écran placées en dehors des deux cônes, reçoit des rayons lumineux. Aussi la région G est privée des rayons venant du point B, mais en reçoit du point L; inversement la région H, qui est dans l'ombre par rapport au point L, est éclairée par le point B. Ainsi l'écran se trouvera divisé en trois régions distinctes : la partie centrale qui ne recevant aucun rayon sera l'*ombre*, une partie située autour de la première et qui recevra quelques rayons lumineux, ce sera la *pénombre* (ou *presque ombre*), enfin les bords de l'écran qui seront complétement éclairés.

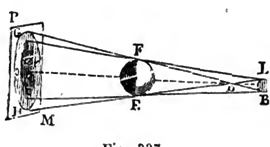


Fig. 337.

497. Des faits nombreux viennent justifier les inductions qui précèdent. Lorsque la lumière d'une bougie se trouve interceptée par un corps opaque, l'ombre que celui-ci projette sur les murs n'est jamais parfaitement définie dans ses contours et la partie la plus obscure est entourée d'une partie qui l'est moins. Le phénomène est d'autant plus sensible que le corps opaque est plus près

de la bougie et plus éloigné du mur. Il en est de même de l'ombre projetée par les édifices qu'éclaire le soleil. Mais si, au contraire, on prend une source lumineuse se réduisant sensiblement à un point, comme la lumière électrique, l'ombre se trouve parfaitement définie, la pénombre disparaît.

498. **Images dans la chambre obscure.** — Le principe de la propagation rectiligne de la lumière donne l'explication des phénomènes observés dans une chambre obscure où la lumière pénètre par une ouverture étroite. Si on reçoit sur un écran blanc les rayons venant d'une source de lumière, ou renvoyés par les objets qu'elle éclaire au dehors, on voit se peindre l'image de cette source ou de ces objets, image bien définie quand l'ouverture du volet est petite, devenant plus vague et disparaissant même quand les dimensions de cette ouverture augmentent. Ces images sont du reste renversées par rapport aux objets éclairés et conservent les couleurs des points représentés.

La figure 338 nous permet d'expliquer ces phénomènes. Soient AB la source lumineuse, AC, AD des objets éclairés par elle, O l'ou-

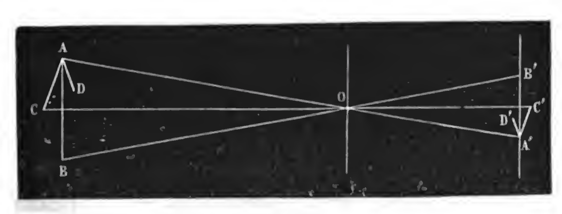



Fig. 338.

verture du volet. Les rayons qui partent des différents points A, B, C, D, viennent faire dans la chambre obscure, sur un écran, de petites taches lumineuses A', B', C', D' qui conservent la teinte des objets correspondants et la forme de l'ouverture. Si celle-ci est petite, toutes ces taches se réduisent à des points lumineux dont l'ensemble reproduit l'image des objets, et, comme on le voit, le point A qui est au-dessus de la ligne horizontale CC', donne son image en A' au-dessous de cette ligne. Si l'ouverture devient plus grande, les taches lumineuses acquièrent des dimensions finies, se recouvrent l'une l'autre et la netteté disparaît.

* 499. **Image du soleil.** — Le soleil peut donner son image

dans la chambre obscure. Si l'écran est perpendiculaire à la direction des rayons lumineux, l'image sera ronde; elliptique, quand il sera incliné sur eux.

On se rend compte de la même manière des images fournies par le soleil quand sa lumière passe à travers les intervalles que laissent entre elles les feuilles des arbres.

500. **Vitesse de la lumière.** — En 1675, Rœmer, astronome danois, appelé par Louis XIV à l'Observatoire de Paris, détermina par des méthodes astronomiques la vitesse de la lumière. Dans ces derniers temps, M. Fizeau est parvenu par des méthodes directes et très-élégantes à confirmer les résultats obtenus par Rœmer. Nous admettrons avec ces deux savants que la vitesse de la lumière est de 300000 kilomètres par seconde, de sorte que la lumière ferait le tour de la terre en moins de $\frac{1}{7}$ de seconde. MM. Fizeau, Bréguet et Foucault ont prouvé que la vitesse de la lumière est plus grande dans l'air que dans l'eau. Le rapport des deux vitesses est environ $\frac{4}{3}$.

---

## CHAPITRE II

### RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.
### MIROIRS. — RÉFRACTION. — PRISMES. — LENTILLES.
### DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

501. Lorsqu'un rayon lumineux EC (fig. 339) tombe sur une surface polie AB, elle est renvoyée par lui dans une direction CF, qui est soumise à deux lois que nous allons étudier, après avoir donné quelques définitions nécessaires à l'intelligence de ce qui va suivre.

On appelle *normale* au point d'incidence la perpendiculaire CD élevée sur la surface polie au point C, où le rayon lumineux vient la frapper. L'*angle d'incidence* est l'angle ECD formé par le rayon incident et la normale, l'*angle de réflexion* est l'angle DCF formé avec la normale par le rayon réfléchi.

502. **Lois de la réflexion.** — 1° *Le rayon réfléchi reste dans le plan de l'angle d'incidence ; 2° l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux entre eux.*

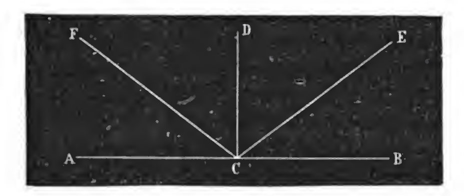



Fig. 339.

Ces deux lois peuvent être démontrées expérimentalement de la manière suivante.

Un cercle divisé CBL (fig. 340) est fixé à la colonne NN' que porte un trépied P muni de vis calantes qui permettent de mettre

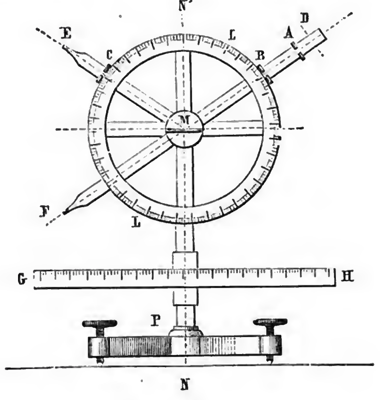



Fig. 340.

l'appareil bien vertical. E,D sont des alidades mobiles autour du centre du cercle, et portant des diaphragmes B et C. Ces diaphragmes sont perpendiculaires aux alidades et percés en leurs milieux de trous égaux dont les centres sont à égale distance du cercle divisé. En M est un miroir que l'on fixe de manière que sa

surface soit exactement horizontale. Pour démontrer, à l'aide de cet appareil, les lois qui nous occupent, après avoir rendu le plan du cercle et le diamètre NN' bien verticaux, on incline un miroir placé en A de manière à recevoir sur lui un rayon lumineux qu'il renvoie parallèlement au plan du cercle à travers le trou du diaphragme B. Ce rayon vient tomber au milieu du miroir M et se réfléchit. On fait alors varier la position de l'alidade E, et on trouve toujours pour elle une position telle que le rayon réfléchi vienne passer à travers le trou du diaphragme C. Ce premier fait nous démontre la première loi de la réflexion, puisque le rayon lumineux, après avoir frappé le miroir, s'est réfléchi de telle sorte qu'il vienne passer par le trou du diaphragme C situé, comme nous l'avons dit, à une distance du plan du cercle égale à celle qui sépare de ce cercle le centre du trou B. De plus, on remarque que l'alidade mobile a pris une position telle que l'angle compris entre les alidades et le diamètre vertical NN' sont égaux entre eux. Si, par exemple, l'alidade D a été placée à 45° de NN', l'alidade E, lorsque le rayon réfléchi passe à travers le diaphragme C, se trouve aussi à 45° de NN'.

503. **Diffusion ou réflexion irrégulière.** — Les corps non polis, tels que les murs blancs, le papier, ont aussi la propriété de renvoyer les rayons lumineux qui tombent sur leur surface; mais, au lieu de les renvoyer dans une direction unique soumise aux lois que nous venons d'étudier, ils les renvoient dans tous les sens. Ce phénomène a déjà été signalé par nous dans l'étude de la chaleur; il est désigné sous le nom de *diffusion*.

C'est grâce à la diffusion des rayons lumineux produits à la surface des objets que nous pouvons voir ces objets. Supposons-nous au milieu d'une chambre parfaitement obscure, les objets qu'elle renferme ne sont pas vus par nous; allumons une lampe, et les rayons lumineux qu'elle émet, allant frapper les corps situés dans la chambre, sont diffusés par eux dans tous les sens, renvoyés à notre œil, qui peut alors voir des objets tout à l'heure invisibles pour lui.

504. **Miroirs.** — On appelle *miroirs* des corps dont la surface, parfaitement polie, peut réfléchir les rayons lumineux. Suivant que leur surface est plane ou courbe, les miroirs sont dits eux-mêmes plans ou courbes; les effets produits sont du reste différents dans ces deux cas.

505. **Miroirs plans.** — Un miroir plan nous fait voir les objets dans une position symétrique de celle qu'ils occupent par rap-

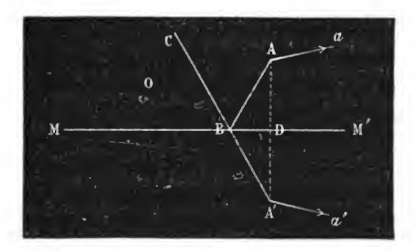



Fig. 341.

port à sa surface. Ainsi, si nous présentons devant un miroir MM' (fig. 341) un objet A*a* en l'inclinant par rapport à ce miroir, l'image A'*a*' que nous apercevons derrière le miroir est aussi inclinée et située de telle sorte que A', image de A, soit à une distance A'D derrière le miroir égale à la distance AD du point A à ce miroir. Il en est de même des images de tous les points du corps A*a*.

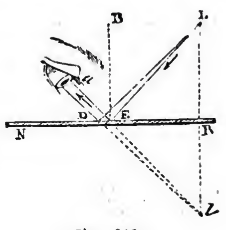



Fig. 342.

Ce fait expérimental résulte de ce que tous les rayons lumineux émis par un point L (fig. 342) se réfléchissent de manière que les prolongements des rayons réfléchis aillent tous se couper derrière le miroir en un point *l*, symétrique de L, c'est-à-dire situé derrière le miroir sur la perpendiculaire LR, à une distance *l*R égale à LR. Nous admettrons ce principe, dont la démonstration se trouve en note et pourra être étudié par les personnes ayant quelques notions de géométrie[1]. L'œil, recevant une série de

[1] Soit BC l'un des rayons réfléchis (fig. 340) : si nous le prolongeons, il ira rencontrer en A' la perpendiculaire AD, abaissée du point A sur le miroir ; et les triangles ABD, BDA' seront égaux. En effet, ils sont rectangles et ont le côté BD commun. De plus, les angles ABD, DBA' sont égaux, car DBA' = CBM comme opposés par le sommet, CBM et ABD sont de plus égaux comme compléments des angles égaux d'in-

rayons dont les prolongements vont tous se couper en un même point, suppose qu'en ce point se trouve une source lumineuse, et c'est de là que résulte pour nous la sensation d'une *image symétrique de l'objet.*

Nous remarquerons que l'image donnée par un miroir plan ne constitue pas un véritable objet lumineux ; elle n'existe que pour l'œil placé sur le trajet des rayons réfléchis; elle est dite *virtuelle* par opposition avec les images *réelles* fournies dans d'autres circonstances, et que l'on peut recevoir sur un écran, toucher de la main, et qui sont alors de vrais corps lumineux.

506. **Miroirs parallèles inclinés.** — Lorsqu'un objet lumineux L (fig. 343) est placé entre deux miroirs plans parallèles, il donne une série indéfinie d'images d'intensités décroissantes et qui sont toutes situées sur la perpendiculaire commune abaissée sur les miroirs par le point L. La figure 343 montre comment un œil placé en O peut apercevoir ces différentes images, c'est qu'il reçoit des rayons ayant subi une, deux, trois réflexions. On voit du reste que l'image L' formée par le miroir NN joue le rôle d'objet lumineux par rapport au miroir MM, puisque les rayons réfléchis par NN, dont les prolongements passent au point L', vont rencontrer le miroir MM, s'y réfléchissent et donnent en A l'image de L' symétrique de L par rapport à MM, et ainsi de suite.

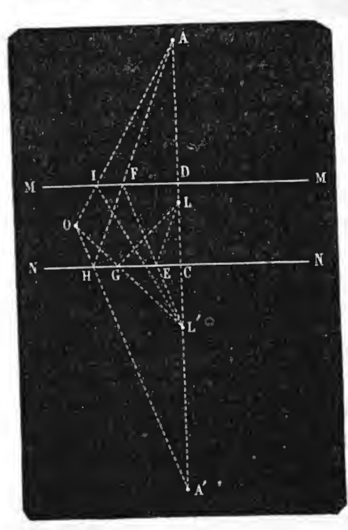


Fig. 343.

Quand les miroirs, au lieu d'être parallèles, sont inclinés l'un

fluence et de réflexion, donc les triangles rectangles ABD, DBA' sont égaux et AD = DA'. Mais le raisonnement pouvant se répéter pour tout rayon émané du point A et réfléchi par le miroir, le principe se trouve démontré.

sur l'autre, les images se disposent autour du sommet de l'angle et forment ces figures que nous fournit le kaléidoscope.

507. Les miroirs dont on se sert ordinairement donnent lieu à deux images. Ce sont des miroirs de glace formés d'une certaine épaisseur de verre et d'une couche métallique ou *tain* située derrière le verre. Le tain des miroirs est un amalgame d'étain, c'est-à-dire une combinaison de mercure et d'étain. Les miroirs de glace ayant ainsi deux surfaces réfléchissantes, donnent lieu à deux images, l'une assez faible formée par la surface extérieure du verre, l'autre par l'amalgame. Cette dernière est celle que l'on voit ordinairement. Pour apercevoir bien distinctement la première, il faut se placer très-obliquement par rapport au miroir.

On peut constater l'exactitude de ce qui précède en plaçant une bougie près d'un miroir de glace. On observera quelquefois plus de deux images dues à ce que les deux surfaces réfléchissantes jouent l'une par rapport à l'autre le rôle de miroirs parallèles.

508. **Formation de spectres au théâtre.** — On a fait dans

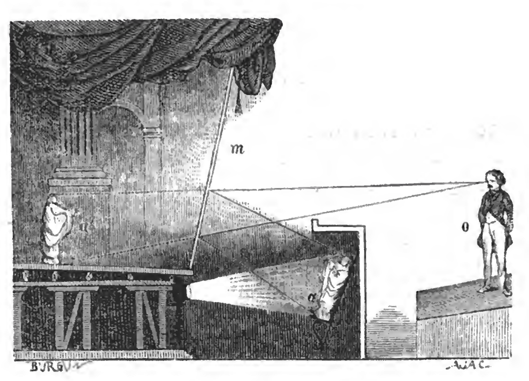



Fig. 344.

ces derniers temps une application assez ingénieuse des lois de la réflexion et des propriétés des miroirs plans, pour faire apparaître sur la scène d'un théâtre des spectres immatériels dont les mouvements et les gestes produisent sur la foule un saisissant effet.

image
not
available

510. **Miroirs concaves.** — 1° *Foyer principal.* Si, à travers un trou percé dans le volet d'une chambre noire, on reçoit un faisceau de rayons parallèles, de rayons solaires, par exemple, sur un miroir concave placé de telle sorte que son axe soit parallèle à la direction du faisceau, on constate que tous ces rayons viennent se couper après réflexion en un point L (fig. 345), si-

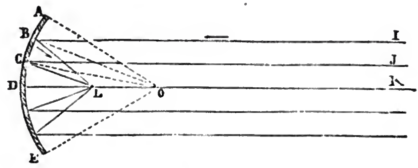



Fig. 345.

tué sur l'axe principal au milieu du rayon OD de la surface sphérique. Ce point L d'intersection de tous les rayons parallèles à l'axe sur le miroir est appelé *foyer principal*, et la distance DL *distance focale principale*. Plus le rayon de la sphère est grand, plus évidemment la distance focale principale, qui en est la moitié, sera grande aussi.

2° *Foyers conjugués.* Dans une chambre obscure, en un point O (fig. 346) de l'axe principal d'un miroir concave, plaçons un point

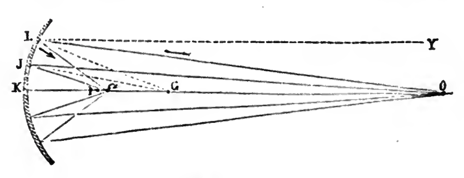



Fig. 3 6.

lumineux, donné soit par une lampe électrique, soit par la concentration des rayons solaires en ce point par un appareil d'optique. Les rayons émis par ce point et qui vont frapper le miroir sont réfléchis par lui et vont tous se couper en un seul point *a* qui est appelé *foyer conjugué* du point O. Ce nom vient de la liaison qui existe entre les positions des points O et *a*.

Si O se trouve au delà du centre G, par rapport au miroir,

*a* sera situé entre le foyer principal F et le centre C. Si le point O s'approche du centre, *a* s'en rapproche aussi. Quand le point lumineux arrive au centre, le foyer conjugué s'y trouve aussi ; quand il passe entre le centre et le foyer principal, pour occuper les positions qu'avait tout à l'heure le foyer conjugué, celui-ci passe de l'autre côté pour occuper à son tour les positions qu'avait le point lumineux. Quand la source lumineuse arrive au foyer principal, les rayons sont réfléchis parallèlement à l'axe. Enfin, quand elle se trouve entre le foyer principal et le miroir, en P, par exemple (fig. 347), les rayons sont réfléchis de telle sorte qu'au lieu de converger vers un point de l'axe, ils s'en éloignent, et ce sont leurs prolongements géométriques qui vont se couper en F′, qui est le *foyer conjugué virtuel* du point P.

Lorsque le point lumineux A se trouve au-dessus de l'axe fig. 348), son foyer conjugué se trouve en *a*, au-dessous de l'axe et sur la ligne qui passe par A et le centre C. Il y a sur cette ligne appelée *axe secondaire* du point A, pour les positions de la source lumineuse et de son foyer conjugué, des relations analogues à celles qui existent lorsque le point lumineux est sur l'axe principal. Si le point lumineux est en B, au-dessous de l'axe principal, son foyer conjugué se trouve au-dessus en *b* sur l'axe secondaire BI.

Fig. 347.

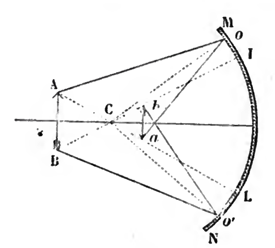


Fig. 348.

3° *Images fournies par les miroirs concaves.* L'image d'un objet est l'ensemble des foyers conjugués des différents points de l'objet ; on comprend, d'après ce qui vient d'être dit, que cette image *ab* soit renversée par rapport à l'objet AB (fig. 347).

L'expérience montre que, lorsque l'objet, la flamme d'une bougie, par exemple, est très-loin du miroir, son image reçue sur

un écran en papier ou en verre dépoli est *réelle, renversée, et plus petite que l'objet.* A mesure que la bougie s'approche, l'image grandit, et l'on est obligé, pour la recevoir, d'éloigner l'écran du miroir. Lorsque la bougie est au centre, l'image s'y trouve aussi, et *de même grandeur.* Pour des positions de la flamme situées entre le foyer principal et le centre, l'image est de l'autre côté du centre, *renversée et plus grande que l'objet.* La bougie se trouvant entre le foyer principal et le miroir, l'image ne peut plus être reçue sur un écran, elle devient *virtuelle, droite et toujours plus grande que l'objet.*

511. **Miroirs convexes.** — Les miroirs convexes donnent des résultats bien différents de ceux que nous venons d'étudier. Les rayons qui tombent sur eux parallèlement à l'axe, au lieu

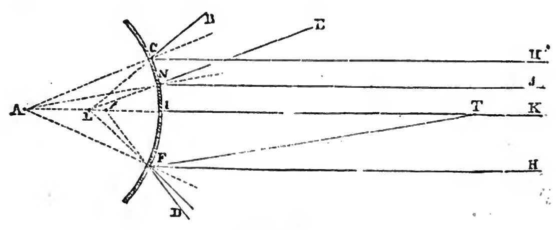



Fig. 349.

de converger vers un point de l'axe vont en divergeant, et ce sont leurs prolongements qui (fig. 349) vont se couper en un point L appelé aussi foyer principal, situé au milieu du rayon AI. Ce foyer est virtuel comme tous ceux que donnent les miroirs convexes.

Les miroirs convexes ne donnent que des images *virtuelles, droites* et plus *petites* que l'objet.

## RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

512. Lorsqu'un rayon lumineux rencontre sur son pasage des corps transparents, il y pénètre et on dit alors qu'il change de milieu. Lorsque le rayon est oblique à la surface de séparation des deux milieux, ce changement de milieu est accompagné

d'une déviation dans la direction du rayon. On dit alors qu'il se *réfracte*. La valeur de cette déviation varie avec la nature des milieux qui sont dits *plus* ou *moins réfringents*, suivant que cette déviation est plus ou moins grande.

Les deux rayons incident et réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface de séparation. Le rayon AB (fig. 350) se rapproche de la normale au point d'incidence B, quand il passe d'un milieu moins dense dans un milieu plus dense, de l'air dans le verre ou dans l'eau par exemple. Au lieu de continuer sa marche suivant le prolongement de AB, il la continue suivant BC.

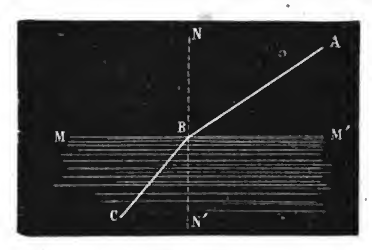


Fig. 350.

Dans le cas contraire, le rayon se réfracte en s'éloignant de la normale. Aussi le rayon CB, après avoir cheminé dans le verre, sort dans l'air et prend la direction BA.

Si le rayon tombait perpendiculairement à la surface de séparation, il continuerait sa route sans déviation.

On peut vérifier tous ces faits à l'aide de l'appareil que nous avons employé pour les lois de la réflexion de la lumière (302), en substituant au miroir un demi-cylindre de verre ABC (fig. 351), disposé de telle sorte que son axe soit horizontal et que sa base coupe le plan du cercle gradué suivant l'horizontale AB. Un rayon arrivant suivant FO se réfracte et prend la direction OE; arrivé au point E, comme il s'est propagé dans le verre, suivant

Fig 351.

le rayon du cylindre EO, il est normal à la surface courbe et en sort sans déviation suivant EG.

513. **Déplacement des objets vus par réfraction.** — Les principes que nous venons de poser peuvent servir à expliquer des faits qui se présentent souvent.

Prenons une auge primitivement vide, au fond de laquelle se trouve un point brillant M (fig. 352). L'œil placé en O recevant

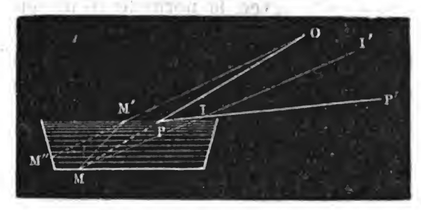



Fig. 352.

un rayon MPO verra le point en M ; mais si on vient à verser de l'eau dans l'auge, le rayon MP, qui auparavant allait directement à l'œil O, sera rejeté par la réfraction en PP' et n'arrivera plus dans l'œil, mais un autre rayon MM' qui, avant qu'on ait versé de l'eau, passait au-dessus du point O, pourra être rejeté suivant M'O, et l'œil verra le point sur le prolongement de M'O en M''. La position apparente du point lumineux se trouve relevée. L'expérience peut se faire avec une pièce de monnaie.

Si on plonge un bâton dans l'eau, il paraît brisé, car la partie immergée se trouvant relevée par la réfraction ne paraîtra plus située dans le prolongement de la partie extérieure, mais semblera inclinée sur elle.

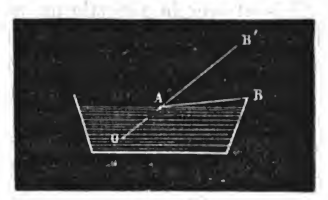



Fig. 353.

Lorsqu'on est plongé sous une eau bien claire et tranquille, les objets placés sur les bords tels que B (fig. 353) semblent relevés au-dessus de leur véritable place. Le point B, par exemple, envoyant un rayon BA, celui-ci se réfracte suivant AO, et l'œil, qui placé en O le reçoit, voit le point B en B' sur le prolongement AB' de OA.

514. **Angle limite, réflexion totale.** — Il existe une relation étroite entre la valeur de l'angle d'incidence et celle de l'angle de réfraction. Lorsque le premier augmente, le second augmente aussi et inversement.

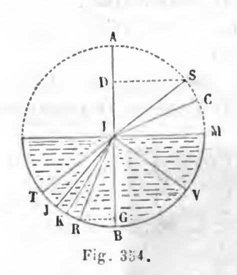


Fig. 354.

Soit (fig. 354) un rayon lumineux DI cheminant dans l'eau et faisant avec la normale IB un angle d'incidence RIB ; il se présente en I pour émerger dans l'air et y prend la direction IC. Si on considère un rayon KI faisant avec la normale IB un angle d'incidence KIB plus grand que RIB, l'angle de réfraction AIC sera plus grand que l'angle AIS. L'angle d'incidence continuant à croître atteint une valeur JIB pour laquelle l'angle de réfraction AIM est droit et sort en rasant la surface de l'eau. Si, à partir de cette valeur, l'angle d'incidence croît encore, l'angle de réfraction devant croître avec lui devra être plus grand que AIM, par suite le rayon ne sortira pas de l'eau et se réfléchira en I. C'est ce qui arrive pour le rayon TI, qui se réfléchit suivant IV. On dit alors qu'il y a *réflexion totale.*

L'angle JIB, qui est la valeur limite que puisse prendre l'angle d'incidence pour qu'il y ait émergence, et qui correspond à un angle de réfraction égal à 90°, est appelé *angle limite.* Sa valeur dépend des milieux considérés. Pour l'eau et l'air, il est de 48°35′ environ, c'est-à-dire que tout rayon, cheminant dans l'eau et faisant avec la normale un angle d'incidence plus grand que 48°35′, ne pourra sortir de l'eau et sera réfléchi à l'incidence : pour le verre et l'eau, il est de 42° environ.

515. **Mirage.** — Le phénomène de la réflexion totale sert à expliquer un effet très-intéressant qui se produit surtout dans les plaines arides, échauffées par un soleil brûlant, et qui est désigné sous le nom de *mirage.* Il a été souvent observé par nos soldats de l'expédition d'Égypte. Monge, qui accompagnait Bonaparte, le décrit de la manière suivante :

« Dès que la surface du sol est suffisamment échauffée par la présence du soleil, et jusqu'à ce que, vers le soir, elle commence à se refroidir, le terrain ne paraît plus avoir la même ex-

tension, et il paraît terminé à une lieue environ par une inondation générale. Les villages qui sont placés au delà de cette distance paraissent comme des îles situées au milieu d'un grand lac, et dont on serait séparé par une étendue d'eau plus ou moins considérable. Sous chacun des villages, on voit son image renversée telle qu'on la verrait effectivement s'il y avait une surface d'eau réfléchissante ; seulement cette image est à une assez grande distance, les petits détails échappent à la vue, et l'on ne voit distinctement que les masses ; d'ailleurs les bords de l'image renversée sont un peu incertains, et tels qu'ils seraient dans le cas d'une eau réfléchissante, si la surface de l'eau était un peu agitée.

« A mesure que l'on approche d'un village qui paraît placé dans l'inondation, le bord de l'eau apparente s'éloigne ; le bras de mer qui semblait vous séparer du village se rétrécit, il disparaît enfin entièrement, et le phénomène, qui cesse pour ce village, se reproduit sur-le-champ pour un nouveau village, que vous découvrez derrière, à une distance convenable.

« Ainsi, tout concourt à compléter une illusion, qui quelquefois est cruelle, surtout dans le désert, parce qu'elle vous présente vainement l'image de l'eau dans le temps où vous en éprouvez le plus grand besoin. »

Voici l'explication que Monge a donnée de ces phénomènes.

Les couches d'air en contact avec le sol brûlant s'échauffent et prennent une densité moindre que celle des couches supérieures, de telle sorte que la densité de l'air va en croissant jusqu'à une certaine hauteur, pour laquelle l'atmosphère se trouve soustraite à l'influence du sol. A partir de ce niveau, la densité de l'air va en décroissant, comme cela arrive ordinairement.

Cela posé, considérons un point élevé A (fig. 355) et un observateur placé en O. Cet observateur verra le point A par le faisceau direct AO; mais il pourra recevoir des rayons qui lui viendront de A, après avoir suivi une marche bien moins directe. Considérons, par exemple, le rayon AB, qui tombe obliquement sur la couche d'air M, à partir de laquelle la densité va en diminuant, à mesure qu'on s'approche du sol. Cette couche étant moins dense que la précédente, le rayon, en y pénétrant, s'écarte de la normale suivant BC, de même le rayon BC arrivé en C doit

encore s'éloigner de la normale en pénétrant dans la couche N. On voit que ces réfractions ont pour effet de donner aux rayons lumineux une direction plus voisine de l'horizontalité. Mais comme il arrivera un moment où l'angle d'incidence aura dépassé

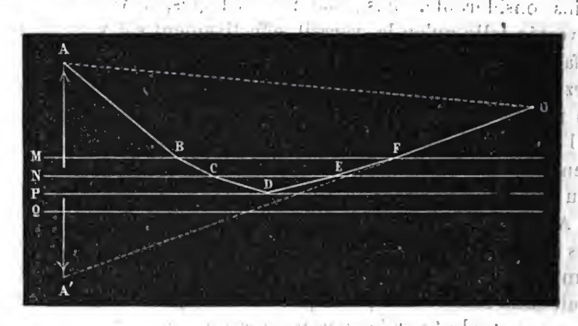



Fig. 355.

la valeur de l'angle limite, le rayon ne pourra plus pénétrer dans la couche moins dense qui suit celle où se il trouve. En D, par exemple, il éprouvera le phénomène de la réflexion totale et sera renvoyé suivant DE. A partir de là, il se réfractera en sens inverse, puisqu'il traversera des couches de plus en plus denses et arrivera à l'œil suivant FO. L'observateur supposera alors le point lumineux en A' sur le prolongement de OF. Comme ce raisonnement peut être répété pour tous les points de l'objet lumineux, on apercevra une image renversée de cet objet et semblable à celle que donnerait une nappe d'eau.

Pour reproduire artificiellement le phénomène du mirage, il suffit de chauffer un peu fortement une grande plaque de tôle et de la regarder dans une direction très-inclinée; on voit alors l'image des objets éloignés se former par réflexion sur la couche d'air qui la touche.

516. **Action des prismes sur la lumière.** — On nomme *prisme* en optique un milieu transparent limité par deux plans qui se coupent. Les prismes destinés aux expériences de physique sont ordinairement des morceaux de verre bien homogène taillés en prismes triangulaires droits (fig. 356). En coupant le

prisme par un plan perpendiculaire aux arêtes, on obtient pour section un triangle que l'on appelle *section principale*.

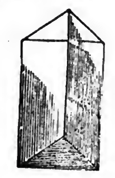


Fig. 356.

Lorsque la lumière traverse un prisme, elle subit une déviation qu'il est facile d'expliquer. Supposons que ABC (fig. 357) représente la section principale d'un prisme, et considérons ce qui se passe dans son plan. Soit SI un rayon incident; lorsqu'il pénètre dans le prisme, au lieu de continuer suivant IL, il se réfracte suivant II' en se rapprochant de la normale IO; arrivé en I' il se réfracte suivant I'S', en s'éloignant de la normale I'O, puisqu'il passe d'un milieu plus dense dans un milieu moins dense. On voit que ces deux réfractions ont pour effet de reporter les rayons vers la base BC du prisme, et les objets vus à travers

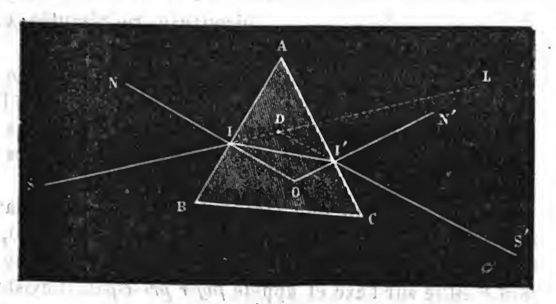



Fig. 357.

lui semblent reportés vers son sommet A, car l'effet que nous observons dans une seule section s'observe dans toutes les autres.

517. Lorsqu'un rayon lumineux traverse un milieu à faces parallèles, une lame de verre, il en sort parallèle à sa direction primitive, mais il ne se trouve pas exactement sur son prolongement. La distance de ces deux directions parallèles, nulle dans le cas de l'incidence normale, ne devient sensible que pour des inclinaisons un peu fortes ou pour des épaisseurs notables du milieu traversé.

518. **Lentilles.** — On appelle *lentilles* un milieu réfringent compris entre deux portions de surfaces sphériques; elles sont ordinairement en verre.

On en emploie de deux espèces principales : 1° les lentilles *convergentes*, qui font converger vers un seul point des rayons divergents; 2° Les lentilles *divergentes*, qui augmentent la divergence des rayons.

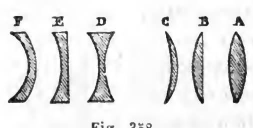


Fig. 358.

A, B, C (fig. 358) représentent des lentilles convergentes; on voit qu'elles sont plus épaisses au milieu qu'aux extrémités. D, E, F représentent des lentilles divergentes, elles sont plus épaisses aux extrémités qu'au milieu.

519. **Effets des lentilles convergentes.** — Parmi les lentilles convergentes, nous ne considérerons que la lentille biconvexe représentée en A (fig. 358).

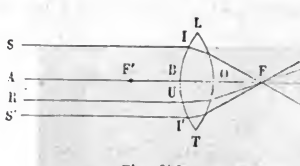


Fig. 359.

On appelle *axe principal* d'une lentille biconvexe la ligne joignant les centres des deux surfaces sphériques qui limitent cette lentille.

1° Lorsqu'on reçoit sur une lentille biconvexe un faisceau de rayons solaires parallèles à l'axe principal ABO (fig. 359), ces rayons vont tous, après avoir traversé la lentille, se couper en un point F situé sur l'axe et appelé *foyer principal*. Il existe un foyer principal de chaque côté de la lentille.

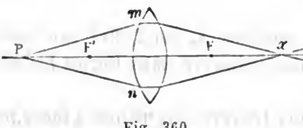


Fig. 360.

2° Un point lumineux P (fig. 360), situé sur l'axe devant une lentille *mn*, envoie sur elle des rayons qui vont se couper tous en un point *x* situé aussi sur l'axe, de l'autre côté de la lentille, et appelé *foyer conjugué*. Inversement, des rayons partis du point *x* iraient se couper au point P.

3° Lorsque le point lumineux P (fig. 361) se trouve entre le foyer principal et la lentille, les rayons qu'il émet, au lieu de converger en sortant de la lentille, vont en divergeant, comme *nr* et *ns*, et ce sont leurs prolongements qui vont se couper

en $x$; le point $x$ est alors un foyer *conjugué virtuel*, au lieu d'être réel comme dans les précédents.

4° Lorsque le point lumineux est au-dessus de l'axe comme A (fig. 362), son foyer conjugué est en A′ au-dessous de l'axe et situé sur la ligne qui passe par le point A et un certain point cen-

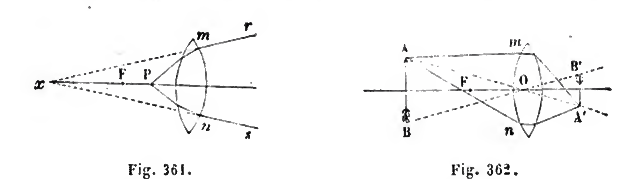


Fig. 361. Fig. 362.

tral O de la ligne appelée *centre optique*. Un point B, situé au-dessous de l'axe, donnerait son foyer en B′ au-dessus de l'axe.

520. **Formation des images dans les lentilles biconvexes.** — L'image d'un objet est l'ensemble des foyers conjugués des différents points de l'objet. Quand on place un objet lumineux devant une lentille, la flamme d'une bougie, on peut recevoir derrière elle sur un écran l'image renversée de la flamme (fig. 363).

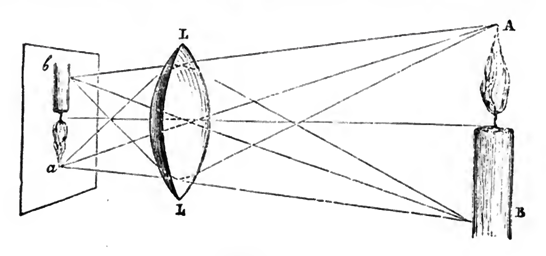


Fig. 363.

Si la flamme est très-loin, l'image est très-près du foyer principal; elle est, d'ailleurs, renversée, réelle et plus petite que la flamme.

Si la bougie se rapproche de la lentille, l'image s'en éloigne et grandit ; si elle est au double de la distance focale principale, l'image est à la même distance de l'autre côté; elle est de même grandeur que la bougie; si la flamme se rapproche encore, l'image

s'éloigne et devient plus grande que l'objet, elle devient bientôt assez grande et assez éloignée pour qu'on ne puisse plus l'atteindre.

Quand la flamme se trouve entre le foyer principal et la lentille, l'image ne se forme plus sur l'écran, elle devient virtuelle, et l'œil qui reçoit les rayons divergents sortant de la lentille voit une image droite et amplifiée de la bougie.

521. **Lentilles divergentes.** — Les lentilles divergentes, parmi lesquelles nous citerons la lentille biconcave, représentée en D (fig. 358), ne donnent que des foyers virtuels, des images virtuelles droites et plus petites que l'objet.

## DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE. — SPECTRE SOLAIRE.

522. La lumière blanche et incolore du soleil est composée de rayons différemment colorés. Avant Newton [1], on avait remarqué que les rayons se teignaient des couleurs de l'iris en tra-

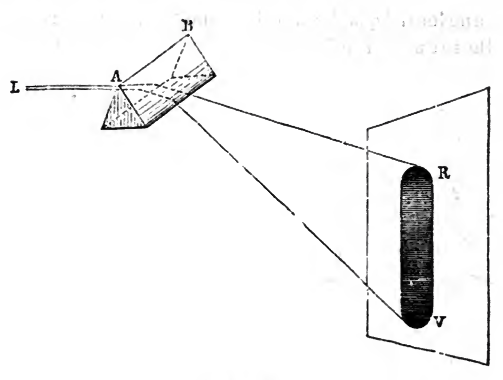



Fig. 364.

versant un prisme de verre, mais on n'avait pas déduit de ce fait les conséquences importantes que Newton sut découvrir.

Si on reçoit dans une chambre obscure un faisceau très-délié

[1] Newton, illustre savant anglais, né en 1642, mort en 1727.

de rayons solaires (fig. 364), il va former sur un écran une image ronde de l'astre. Mais si l'on place un prisme sur le trajet du faisceau LA, celui-ci se trouve dévié, et l'image ronde et blanche est changée en une image oblongue RV et présentant sept couleurs principales : *violet*, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge*.

Nous ferons remarquer que dans la figure les parties inférieures V du spectre sont violettes, la partie R supérieure rouge.

La planche placée au commencement du volume représente en AH le spectre solaire.

Newton attribua ce phénomène à une inégale réfrangibilité des rayons différents qui composent la lumière solaire ; et, pour vérifier l'exactitude de cette explication, il reçut sur un prisme successivement les différentes couleurs du spectre. Pour cela, il recevait le spectre sur un petit écran percé d'une ouverture qu'il amenait dans les différentes régions de ce spectre. L'ouverture laissait alors passer successivement chacune des couleurs, et Newton notait la déviation produite sur chacune d'elles par un prisme situé derrière l'écran. Il constata alors qu'elles étaient inégalement déviées, que la plus déviée ou la plus réfrangible était le violet, et que la réfrangibilité décroissait du violet au rouge.

Il est alors très-facile d'expliquer la génération et la forme du spectre solaire. Imaginons qu'il n'y ait dans la lumière blanche que les couleurs extrêmes, le rouge et le violet, nous aurons alors deux images du soleil, l'une rouge en R (fig. 365), l'autre violette en V ; s'il contient sept couleurs, les cinq couleurs intermédiaires donnent cinq petites images interposées entre R et V, et empiétant l'une sur l'autre. De là la forme allongée du spectre, et sa division en bandes colorées.

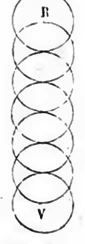


Fig. 3 9

523. **Recomposition de la lumière.** — Pour vérifier sa théorie, Newton fit une série d'expériences ayant pour effet de recomposer la lumière blanche avec les sept couleurs obtenues par une première décomposition ; nous ne citerons que la suivante.

Sur le trajet du faisceau décomposé par un premier prisme, on place un second prisme identique au premier, mais ayant sa base et son sommet tournés en sens inverse (fig. 366). L'action du second prisme devient

inverse de celle du premier, et les rayons séparés à la sortie du premier prisme, qui forment le faisceau divergent CDEF et donneraient par suite une image oblongue et colorée, se trouvent rassemblés à la sortie du second en un faisceau à rayons parallèles qui donnera une image ronde et blanche.

L'effet des prismes est de détruire le parallélisme des rayons solaires ; lorsque le parallélisme subsiste, il n'y a pas de coloration. Aussi un faisceau de rayons solaires qui traverse une lame à faces parallèles en sort blanc comme à l'entrée. L'expérience suivante est souvent faite dans les cours. Une cuvette rectangulaire en glace est divisée en deux compartiments prismatiques par une cloison diagonale en glace. L'un des compartiments est rempli d'eau, il forme alors un prisme ; si l'on reçoit sur la cuve un faisceau solaire, on obtient à la sortie un spectre ; mais si l'on vient à remplir d'eau le second compartiment, l'ensemble des deux prismes forme une lame à faces parallèles, et on obtient une image ronde et blanche du soleil.

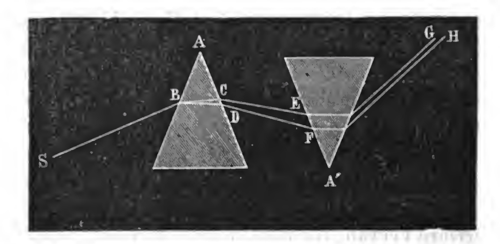



Fig. 366.

524. **Les couleurs du spectre sont des couleurs simples.** — Une couleur est dite *simple* lorsqu'il est impossible de la décomposer en d'autres couleurs, quelles que soient les actions auxquelles on la soumette. Newton a constaté que les sept couleurs du spectre étaient des couleurs simples.

525. **Couleurs des corps.** — Les corps nous deviennent visibles par la lumière qu'ils nous renvoient. Si un corps nous paraît rouge, c'est qu'il ne renvoie à notre œil que les rayons rouges, les autres rayons simples étant absorbés par lui. Un

corps blanc est un corps qui nous les renvoie tous; un corps noir les absorbe tous.

526. **Raies du spectre.** — Une particularité remarquable, offerte par le spectre solaire et qui avait échappé à Newton, a été plus tard reconnue par Wollaston [1] et par Frauenhofer [2]. Quand le spectre solaire est obtenu dans des conditions favorables, il est constitué par une multitude de bandes lumineuses séparées par des raies noires que l'on voit de A en H sur la figure placée au commencement du volume. On leur a donné le nom de *raies* du spectre.

On a reconnu aussi que chaque flamme donnait en général une espèce de spectre particulière ; les gaz incandescents donnent lieu à des spectres formés de raies lumineuses colorées se détachant sur un fond noir : tel est le spectre de l'hydrogène qu'on voit en $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$. — Enfin les vapeurs métalliques incandescentes donnent lieu à des raies brillantes colorées telles que celles qu'on voit en $+C$, $-D$, $+F$, $Na\alpha$ : ces raies lumineuses sont caractéristiques pour chaque métal et MM. Kirschoff et Bunsen ont tiré de là un moyen d'analyse très-sensible. Grâce à elles, ils ont découvert l'existence de deux métaux nouveaux, le cæsium et le rubidium. M. Lamy en a découvert un autre, le *thallium*, en étudiant par la même méthode les résidus boueux des chambres de plomb.

Les corps lumineux des espaces célestes ont été analysés de cette manière. C'est ainsi que l'on a reconnu dans le soleil un grand nombre des corps simples qui constituent notre globe, et l'on a remarqué l'absence de certains autres tels que le cuivre, le zinc, etc.

[1] Wollaston physicien anglais, né en 1766, mort en 1828.
[2] Frauenhofer (Joseph), né à Straubing en 1787, mort en 1827.

# CHAPITRE III

## INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

## LANTERNE MAGIQUE. — CHAMBRE NOIRE. — ŒIL. PHOTOGRAPHIE. — MICROSCOPES. LUNETTES. — TÉLESCOPES. — PHARES.

Les propriétés des lentilles sont appliquées dans la construction des instruments d'optique, loupes, microscopes, lunettes, etc.; celles des miroirs sont appliquées dans la construction des télescopes.

527. **Lanterne magique.** — La lanterne magique est une application de la formation des images réelles données par les lentilles convergentes. Inventée par le père Kircher, elle a été notablement perfectionnée par M. Duboscq, qui a construit un appareil à l'aide duquel on projette commodément sur un tableau les images amplifiées de vues photographiques prises sur verre, ou plus généralement de figures tracées sur des lames transparentes.

Une lanterne MPN (fig. 367), à parois opaques, est soutenue par des colonnes K et K'; elle renferme une source lumineuse, une lampe ou un régulateur de lumière électrique I. Un miroir concave A réfléchit les rayons et les renvoie sur une lentille C, d'où ils sortent parallèles. La pièce représentée par la figure 368 est fixée sur la paroi antérieure de la lanterne, et une coulisse FF reçoit les lames sur lesquelles sont tracées les images à projeter. Ces images, fortement éclairées par les lentilles qui les précèdent, deviennent de véritables objets lumineux dont les lentilles L et M projettent les images agrandies sur un tableau.

528. **Microscope solaire.** — Le microscope solaire, le microscope à gaz, le microscope électrique sont des appareils destinés aussi à former des images agrandies d'objets très-petits. Ils ne diffèrent guère que par la source lumineuse employée. Le micro-

scope solaire, fixé sur les volets d'une chambre obscure, est éclairé par les rayons solaires ; les deux autres, fixés sur la lanterne de

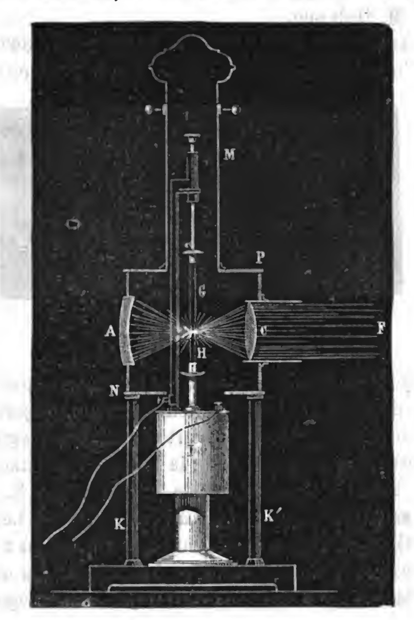



Fig. 367.

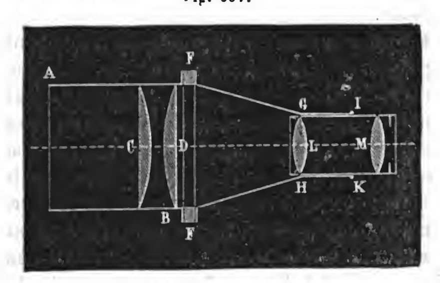



Fig. 368.

M. Duboscq, sont éclairés soit par une lampe à gaz, soit par la lumière électrique.

Tous ces appareils rendent dans les cours les plus grands services, depuis qu'ils ont été appropriés à cet usage par les soins habiles de M. Duboscq.

Le microscope solaire représenté par la figure 369 se fixe sur les volets d'une chambre obscure ; un miroir placé en dehors pro-

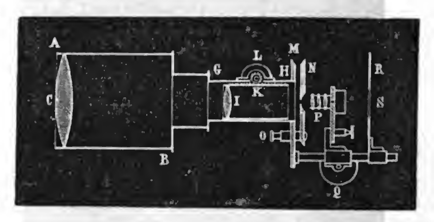



Fig. 369.

jette les rayons du soleil sur une large lentille C placée à l'une des extrémités du tube AB. Une deuxième lentille I reçoit le faisceau et le fait converger près de l'ouverture du diaphragme N, et un peu en deçà de cette ouverture : la lentille I est mobile dans le tube GH et reçoit le mouvement de la crémaillère K. L'objet microspique est placé dans la pince à ressort OHMN. Les deux premières lentilles servent à faire converger sur lui les rayons lumineux : il se trouve ainsi fortement éclairé, et une ou plusieurs lentilles placées en P donnent de l'objet une image agrandie, réelle, qui se projette renversée sur un écran placé à une certaine distance.

529. **Chambre noire.** — La chambre noire dont on se sert en photographie est encore une application des mêmes principes. Une boîte CDS à parois opaques (fig. 370) porte sur sa partie antérieure un tube O muni d'une lentille biconvexe. Dans la coulisse AB peut se fixer un verre dépoli. Un objet éclairé, placé en avant de l'appareil, envoie des rayons sur la lentille, et une image réelle et renversée de cet objet vient se peindre sur le verre dépoli. A l'aide d'un soufflet S ou d'un tirage, on avance ou on recule AB de manière à placer le verre dépoli exactement à l'endroit où se forme l'image, c'est-à-dire au foyer conjugué de l'objet. Cette opération s'appelle la *mise au point*.

530. **Organe de la vue. Œil.** — L'œil est un véritable in-

strument d'optique construit avec cette perfection et cette admirable sagesse que nous rencontrons partout dans la nature. C'est une chambre noire où l'écran en verre dépoli est remplacé

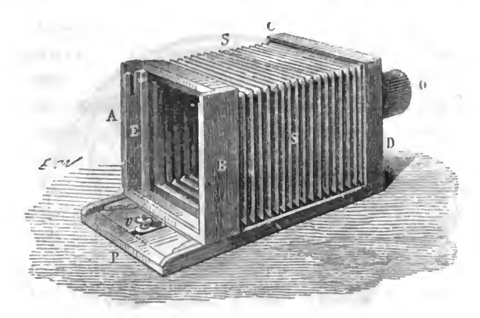



Fig. 370.

par l'épanouissement du nerf optique, sur lequel vient se peindre l'image des objets extérieurs. Il en résulte une sensation qui produit la vision.

Pris dans son ensemble, l'œil a la forme d'un globe contenu dans une cavité osseuse appelée *orbite*. En allant du dehors au dedans, ses parois sont : 1° une membrane opaque S (fig. 371), appelée *cornée opaque* (c'est elle qui, en diffusant les rayons tombant sur l'œil, forme ce qu'on appelle le *blanc de l'œil*); 2° la *choroïde* C; 3° la *rétine* R. Cette dernière, formée par l'épanouissement du nerf optique O, tapisse le fond de l'œil; elle est douée d'une sensibilité exquise pour la lumière. A la partie antérieure du globe, la cornée opaque manque et se trouve remplacée par une membrane transparente A, qui fait saillie comme un verre de montre et que l'on appelle *cornée transparente*. Au point où la cornée transparente se fixe à la cornée opaque, se trouve tendue une membrane I, appelée *iris*, qui varie de couleur chez les différents individus : elle est percée en son centre d'un trou P, appelé *pupille*. Derrière l'iris est placée une lentille biconvexe B, à courbures inégales sur ses deux faces, que l'on désigne sous le nom de *cristallin*. La partie de l'œil comprise depuis la cornée transparente jusqu'à l'iris est désignée sous le nom de *chambre antérieure*; elle est remplie d'un liquide appelé

*humeur aqueuse*, qui remplit aussi l'espace compris entre le cristallin et l'iris, espace désigné sous le nom de *chambre postérieure*. La partie de l'œil située derrière le cristallin est remplie d'un autre

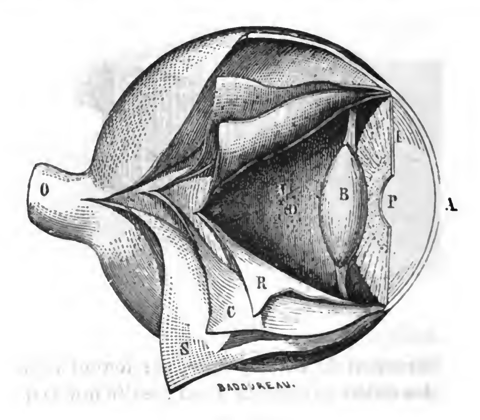



Fig. 371.

liquide appelé *humeur vitrée*; cette dernière est plus réfringente que l'humeur aqueuse.

Cela posé, expliquons en quelques mots le mécanisme de la vision. Supposons pour cela un objet lumineux qui, placé en avant de l'œil en voie sur celui-ci un faisceau de rayons. Parmi ces rayons, les uns se réfléchissent et se diffusent sur la cornée opaque et la rendent visible, d'autres pénètrent à travers la cornée transparente, vont frapper l'iris qui les diffuse et les renvoie au dehors avec la couleur qui lui est propre et qui varie avec les individus. D'autres, enfin, après s'être réfractés dans l'humeur aqueuse, pénètrent à travers la pupille, s'engagent dans le cristallin, dans l'humeur vitrée, et la série de réfractions qu'ils subissent a pour effet de les envoyer former sur la rétine l'image de l'objet. La rétine, impressionnée par eux, transmet au cerveau une sensation qui consiste pour nous dans la vision de l'objet extérieur.

Une expérience très-connue confirme ce qui précède. Si l'on extrait de son orbite un œil encore sain, un œil de bœuf, par

exemple, qu'on l'enchâsse dans un écran après avoir aminci la sclérotique dans les portions en regard de la cornée transparente, et qu'on place vis-à-vis de lui une bougie, on verra se former sur la rétine l'image renversée de la bougie.

531. **Myopes. — Presbytes.** — Pour que la vision soit nette, il est nécessaire que l'objet lumineux vienne former son image sur la rétine, en d'autres termes, que son foyer conjugué coïncide avec cette membrane. C'est ce qui n'arrive pas toujours, parce que les courbures de la cornée et du cristallin varient suivant les individus. Les myopes ne distinguent nettement que les objets situés très-près d'eux, parce que la courbure exagérée de leurs yeux produit une trop grande convergence des rayons et que les objets un peu éloignés ont leur foyer conjugué en avant de la rétine ; les presbytes, au contraire, dont l'œil est trop peu convergent, ne voient que les objets éloignés, ceux qui sont plus proches ayant leur oyer conjugué derrière la rétine. Pour remédier à ces inconvénients, les myopes arment leurs yeux de verres biconcaves qui, comme on le sait, sont divergents, et qui, en diminuant la convergence des rayons, donnent à l'image la place qu'elle doit occuper ; les presbytes emploient, au contraire, des verres biconvexes ou convergents qui, en augmentant la convergence des rayons, font avancer l'image et l'amènent sur la rétine.

532. **Photographie.** — La photographie, que nous étudierons plus en détail dans nos leçons de chimie, comprend un ensemble de procédés ayant pour but de reproduire et de fixer l'image des objets à l'aide de substances chimiquement sensibles à l'action de la lumière. Cette admirable application des sciences physiques, dont l'utilité va chaque jour en augmentant, est due à Joseph Nicéphore Niepce [1] et à Daguerre [2]. Nous laisserons ici de côté la description des procédés principaux actuellement employés.

De même que nous avons comparé l'œil à une chambre noire, nous pourrions comparer un appareil de photographie à un œil qui, au lieu d'être physiologiquement sensible, le serait chimiquement, avec cette différence toutefois que pour l'œil les objets disparaissant, l'image fuit aussi, tandis que l'appareil de photo-

[1] Joseph-Nicéphore Niepce, né à Châlon-sur-Saône, mort en 1833.
[2] Daguerre, né à Cormeilles en 1787, mort en 1851.

graphie reçoit des impressions qu'il est possible de fixer. La plaque photographique sera pour nous la rétine de cet appareil recevant, au point de vue chimique, des impressions que doivent ensuite développer et fixer des réactifs convenablement appropriés.

L'appareil employé pour produire l'image des objets extérieurs est la chambre noire, que nous avons décrite (529).

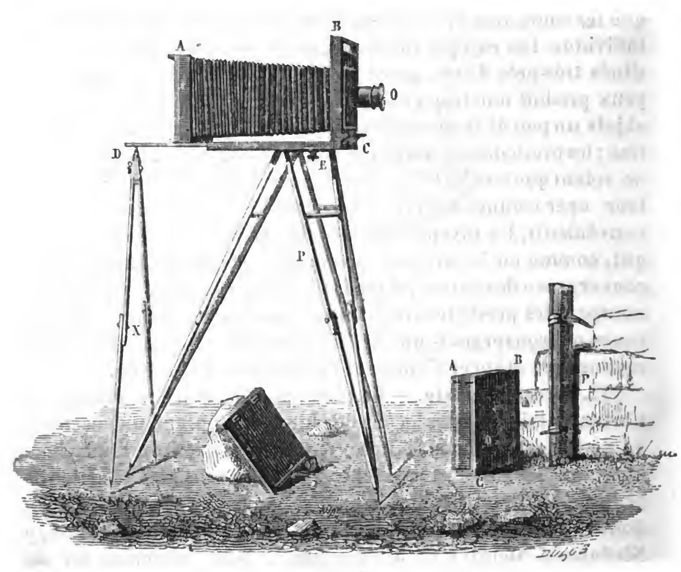



Fig. 372.

La figure 372 représente une chambre noire de voyage montée sur son pied.

Supposons, pour plus de simplicité, que nous voulions reproduire l'image d'une feuille de papier noir au centre de laquelle se trouve un cercle blanc. Nous la placerons en avant de la lentille de la chambre noire, dont nous ferons varier le tirage de manière à avoir sur le verre dépoli l'image aussi nette que possible de l'objet. Cette opération appelée *mise au point* étant faite, on fixe à

l'aide d'une vis V (fig. 370) la position de AB. On enlève le verre dépoli et on lui substitue un châssis EGDF (fig. 372), dans lequel se trouve une plaque de verre chimiquement sensible. Ce châssis est construit de telle sorte qu'une portelette H permet l'introduction de la plaque, et, lorsqu'il est placé, la portelette H étant en dehors et la lentille O de la chambre étant couverte par un diaphragme, on soulève une fenêtre A qui met la plaque à nu dans l'intérieur de la chambre. Le châssis est construit de telle sorte que la plaque occupe exactement la position du verre dépoli que l'on a enlevé. Cela fait, on découvre la lentille, l'image vient alors se produire sur la plaque chimiquement sensible.

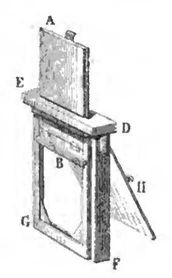


Fig. 373.

Or celle-ci a été recouverte, comme nous le verrons tout à l'heure, d'une substance appelée chlorure d'argent, qui a pour propriété de noircir à la lumière. Pour s'en convaincre, il suffit d'exposer un peu de ce corps à l'action de la lumière solaire, il passe bientôt du blanc au violet et du violet au noir.

La partie blanche de la feuille de papier placée à une certaine distance de la lentille envoie des rayons lumineux sur la plaque sensible et agit chimiquement sur le chlorure d'argent, suivant un cercle qui est la reproduction du cercle blanc ; quant à la partie noire, elle n'envoie pas de rayons et le chlorure d'argent dans toute la région qui lui correspond reste intact. Quand le temps de pose est jugé suffisant, on ferme la fenêtre A et la plaque enfermée dans le châssis est emportée dans un appartement obscur, où l'on *développera* l'image. Car il faut remarquer ici qu'en sortant de l'appareil, la plaque n'offre encore aucune trace d'image, l'action chimique est commencée, mais elle doit être achevée par des réactifs spéciaux. Ces réactifs sont le sulfate de fer ou l'acide pyrogallique en dissolution. On verse l'une de ces liqueurs sur la plaque et au bout de quelques instants on voit apparaître au centre un cercle opaque et noir par transparence; autour de ce cercle la plaque n'ayant pas reçu l'action de la lumière, le chlorure d'argent resté intact lui conserve son aspect opalin. On comprend que, si l'on transportait maintenant la plaque au grand jour, le chlorure d'argent s'attaquerait sur toute la

partie restée intacte, et elle prendrait un aspect uniforme au milieu duquel disparaîtrait l'image du cercle central. Il faut donc arrêter la sensibilité de la plaque, en un mot *fixer l'image*.

Pour cela, avant de la sortir de la chambre obscure, on verse sur la plaque une liqueur capable de dissoudre le chlorure d'argent, ordinairement une dissolution d'hyposulfite de soude ou de cyanure de potassium. Lorsque l'action de ces réactifs est complète, on lave la plaque et on a alors ce qu'on appelle *l'épreuve négative* de l'objet à reproduire, c'est-à-dire une épreuve dans laquelle les blancs de l'objet sont noirs par transparence et les noirs sont devenus blancs. Il est facile de se rendre compte de cet effet. L'hyposulfite de soude, ayant dissous le chlorure d'argent sur toute la partie qui correspond à la région noire de la feuille de papier, la plaque a retrouvé dans cette partie une trasparence complète ; quant au cercle central, il est resté noir parce que le chlorure d'argent qui s'y trouvait, ayant été transformé par l'action de la lumière en un produit noir, est devenu insoluble dans l'hyposulfite de soude. Si donc on regarde la plaque par transparence, on aura justement l'épreuve inverse ou négative de la feuille de papier que nous voulons reproduire. Cette épreuve va maintenant nous servir à reproduire autant d'épreuves directes ou positives que nous voudrons. Elle est devenue un véritable cliché.

Il suffit, pour cela, de placer derrière elle une feuille de papier imprégnée aussi de chlorure d'argent et d'exposer le tout aux rayons solaires. La lumière, pouvant traverser la plaque dans la région transparente qui entoure l'image centrale, ira attaquer le chlorure d'argent et noircir la feuille de papier dans la partie correspondante ; mais, arrêtée par le cercle opaque qui se trouve au centre de la plaque, elle respectera le chlorure d'argent qui se trouve dans la partie correspondante de la feuille de papier, et, au bout de peu de temps, celle-ci sera la reproduction fidèle de la feuille qui nous a servi d'objet. Mais il faut encore, bien entendu, arrêter la sensibilité du papier qui noircirait bientôt sur toute sa surface; pour cela on plonge l'épreuve positive obtenue dans l'hyposulfite de soude, qui, dissolvant cette fois le chlorure d'argent resté intact au centre de la feuille, fixe l'image d'une manière définitive.

533. Nous avons essayé dans ce qui précède de donner une idée simple et facile à saisir des principes mêmes de la photogra-

phie. Nous avons à dessein laissé de côté la description des procédés opératoires, dont le détail aurait pu nuire à la clarté de l'exposition. Nous allons combler cette lacune et exposer aussi rapidement que possible les méthodes à suivre.

Nous diviserons l'opération en sept parties :

| | |
|---|---|
| ÉPREUVE NÉGATIVE.. | 1° Préparation et sensibilisation de la plaque.<br>2° Exposition dans la chambre noire.<br>3° Développement de l'image.<br>4° Fixage de l'image. |
| ÉPREUVE POSITIVE... | 5° Préparation du papier.<br>6° Tirage de l'épreuve.<br>7° Fixage de l'image. |

## ÉPREUVE NÉGATIVE.

534. 1° **Préparation et sensibilisation de la plaque.** — On prend une plaque de glace ou de verre aussi plane que possible, on la nettoie bien à l'alcool additionné d'acide nitrique. On pousse ce nettoyage, qui se fait avec un tampon de coton ou de papier, jusqu'à ce que la glace séchée avec une peau de daim ne présente pas de figures ou de lignes lorsque l'on projette l'haleine sur elle; la vapeur d'eau qui accompagne l'haleine doit se répartir d'une manière uniforme.

La glace étant parfaitement propre, il faut la couvrir de collodion. On donne ce nom à une dissolution de coton-poudre dans un mélange d'alcool et d'éther; le collodion photographique contient en plus des chlorures, bromures et iodures, capables de faire, avec le sel d'argent employé plus tard, des chlorures, bromures et iodures d'argent (nous remarquerons ici que les bromures et les iodures d'argent ont aussi la propriété d'être sensibles à l'action de la lumière).

Pour préparer un litre de collodion, on peut employer la méthode suivante : on prend 750 centimètres cubes d'éther sulfurique rectifié et 1 gramme de coton-poudre mouillé avec de l'alcool. On met le tout dans un flacon à l'émeri, à large ouverture, rigoureusement propre et rincé à l'alcool pur. On agite jusqu'à ce que le coton soit bien imprégné et que toutes les fibres soient bien séparées les unes des autres. On ajoute par parties, et

en remuant chaque fois, 250 centimètres cubes d'alcool rectifié à 40°, 1 gramme iodure de cadmium, 1 gramme bromure de cadmium. Le coton se dissout immédiatement et on continue l'agitation jusqu'à ce que le bromure et l'iodure soient dissous, on laisse reposer vingt-quatre heures, on décante et la partie claire peut servir. Le collodion ainsi préparé doit être très limpide et avoir une belle couleur de rhum.

Le collodionage de la plaque demande un peu d'habitude. On prend la plaque de la main gauche et on la soutient par les côtés de l'angle inférieur gauche, de manière à la toucher sur la plus petite surface possible; de la main droite on prend le flacon de collodion, et, après avoir essuyé le goulot pour enlever la poussière, on verse le liquide à l'angle supérieur droit, d'une manière ré-

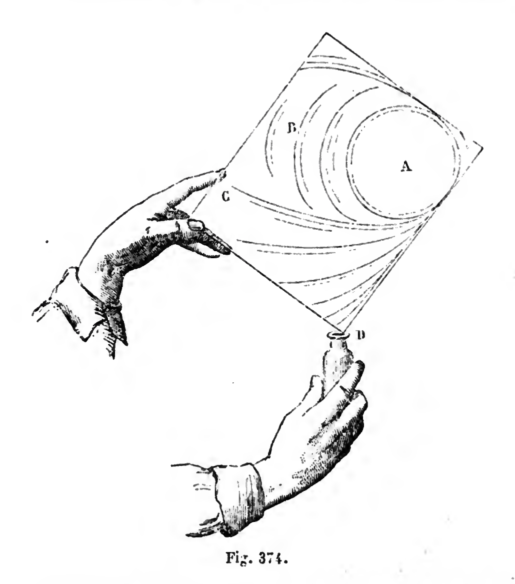



Fig. 374.

gulière et *continue*, de telle sorte que la liqueur s'étend en rond. On cesse de verser quand le liquide arrive à l'angle gauche supérieur; on incline légèrement et lentement la glace de manière à faire écouler l'excès de ce collodion. Il faut avoir soin que le li-

quide ne vienne pas mouiller les doigts qui tiennent la plaque. On laisse alors sécher un instant jusqu'à ce que la liqueur fasse prise : l'éther et le collodion s'évaporent et laissent à la surface de la glace une toile très-fine de coton dans laquelle se trouvent disséminées des molécules de bromure et d'iodure. Ces opérations peuvent à la rigueur être faites à la lumière (fig. 374).

Il faut alors sensibiliser la plaque, c'est-à-dire produire à sa surface les bromure et iodure d'argent sensibles à l'action de la umière. Pour cela, on s'enferme dans un appartement obscur ou éclairé seulement par la lumière qui passe à travers un verre jaune, et on plonge la plaque dans un bain de nitrate d'argent composé, pour un litre, de 1000 grammes d'eau distillée, 70 grammes d'azotate d'argent (fondu ou cristallisé). Il faut avoir soin, pour cela, en renversant un peu la cuvette, d'amasser le bain dans un coin de celle-ci, placer la plaque sur le fond et ramener rapidement le liquide sur elle. On voit alors la glace se recouvrir d'une couche opaline et blanchâtre de bromure et d'iodure d'argent. Au bout d'un certain temps, lorsque tout aspect huileux a disparu à la surface de la glace, on l'enlève avec un crochet d'argent ou de

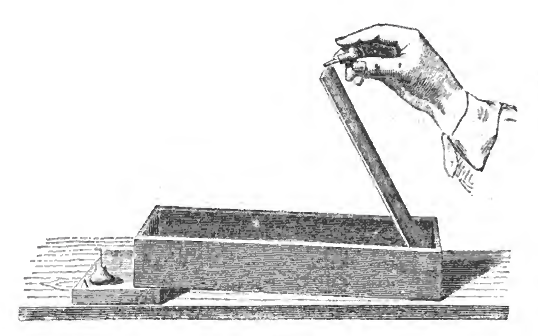


Fig. 375.

baleine (fig. 375), et on la place dans le châssis de la figure 372 la face sensibilisée étant mise du côté de la fenêtre A.

* 535. 2° **Exposition dans la chambre noire.** — On porte alors le châssis dans l'appareil, après avoir pris le point. La durée de la pose varie beaucoup, suivant la lumière et l'objet à repro-

duire. Avec le collodion dont nous avons indiqué la composition, par une belle lumière, pour portraits, sept à huit secondes suffisent amplement.

536. 3° **Développement de l'image.** — Le châssis étant rapporté dans la chambre obscure, on en retire la glace et on verse rapidement sur elle une liqueur composée de :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . . | 1000 gr. |
| Sulfate de protoxyde de fer. . . . . . . . . . | 50 — |
| Acide acétique cristallisable. . . . . . . . . . | 50 — |

L'image apparaît, et, pour en *renforcer* le ton, on y verse alternativement la dissolution de sulfate de fer et une dissolution contenant pour un litre d'eau 30 grammes de nitrate d'argent et 50 grammes d'acide acétique cristallisable.

Par cette opération, qu'on appelle le *renforcement* de l'épreuve, on peut diminuer le temps de pose, et on amène le cliché au ton voulu plus facilement que lorsqu'on emploie seulement le sulfate de fer. L'habitude peut seule faire saisir le moment décisif. Cela fait, on lave la plaque à grande eau.

* 537. 4° **Fixage de l'image.** — Pour fixer l'image, on plonge la plaque dans une dissolution saturée d'hyposulfite de soude ; et, lorsqu'elle a perdu l'aspect blanc bleuâtre qu'elle avait, on l'en retire pour la laver de nouveau. L'épreuve négative est alors terminée. Si elle doit servir à tirer un certain nombre d'épreuves positives, il est bon de la vernir, soit à l'aide de vernis spéciaux que livre le commerce, soit à l'aide d'une dissolution de gomme que l'on verse comme le collodion. On laisse ensuite sécher la plaque.

## ÉPREUVE POSITIVE.

* 538. 5° **Préparation du papier.** — La première préparation du papier consiste à faire pénétrer dans l'une de ses faces un chlorure soluble, comme le chlorure d'ammonium, qui, mis ensuite en contact avec l'azotate d'argent, fournit par double décomposition un chlorure d'argent insoluble qui se fixe dans la pâte et un azotate soluble qui reste dans le bain.

Il suffit de poser pendant cinq minutes la feuille de papier sur

un bain renfermant, pour un litre d'eau distillée, 4 grammes de chlorhydrate d'ammoniaque (chlorure d'ammonium).

Du reste, le commerce livre des papiers tout préparés. Pour les sensibiliser, on pose pendant cinq minutes le côté chloruré de la feuille sur un bain d'argent contenant, pour 1000 grammes d'eau, 150 grammes de nitrate d'argent.

On a soin d'éviter les bulles d'air qui peuvent s'interposer entre le bain et la feuille, puis on enlève la feuille de papier et on la laisser sécher. Ce papier doit être conservé dans l'obscurité.

* 539. 6° **Tirage de l'épreuve positive.** — Pour faire l'épreuve positive, on place le négatif à reproduire dans la presse dite châssis à positif (fig. 376), dont le fond est en glace. La face

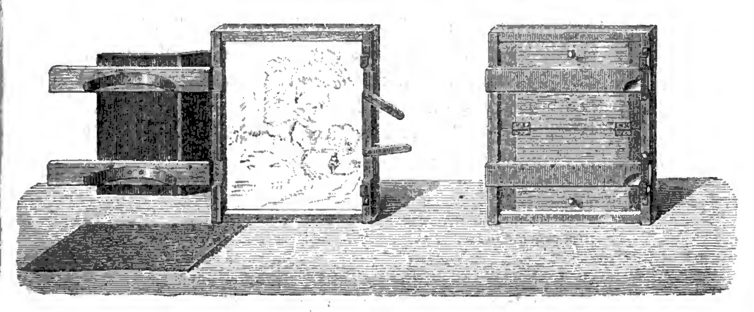


Fig. 376.

où se trouve l'épreuve doit être placée en dessus, et l'on applique sur elle le côté préparé d'une feuille de papier sensible. On place sur le tout une planchette à charnières que l'on applique par la pression de ressorts fixés à des traverses montées à charnières sur les bords du châssis; puis on expose le tout au grand jour, ou même aux rayons solaires jusqu'à ce que le *positif soit bien venu.* Il faut attendre, en général, que les parties commencent à se métalliser. Cette opération, assez délicate, demande de l'habitude. On doit juger, d'après la nature du cliché, jusqu'à quel point l'on doit *pousser* le tirage de l'épreuve. Du reste, on peut suivre le développement de l'image, en ouvrant de temps en temps l'un des côtés de la planchette à charnières et examinant la partie de l'épreuve qui lui correspond. Comme le second ressort presse tou-

jours sur la feuille de papier, il n'y a pas à craindre que celle-ci se dérange, et lorsqu'on referme le châssis, les mêmes parties de la feuille de papier viennent s'appliquer sur les mêmes parties du négatif.

* 540. **Fixage de l'image.** — Pour fixer l'image, il suffit de plonger la feuille dans un bain d'hyposulfite de soude qui dissout le chlorure d'argent. On juge du moment où on doit la retirer du bain en l'examinant par transparence. Au début, elle semble piquetée, *poivrée*, comme disent les photographes; dès que cet aspect disparaît, on retire l'épreuve, on la met pendant vingt-quatre heures dans l'eau qu'on renouvelle de temps en temps, et on laisse sécher.

Par ce moyen, on obtient des épreuves d'un ton assez médiocre; aussi doit-on ordinairement faire ce qu'on appelle le *virage* de l'épreuve. Il y a bien des méthodes employées à cet effet : nous n'en citerons qu'une seule qui réussit parfaitement.

Au sortir du châssis, on lave la feuille de papier sous un filet d'eau jusqu'à ce que l'eau coule limpide, on la plonge ensuite dans un bain composé de :

| | |
|---|---|
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . | 1000 gr. |
| Acétate de soude. . . . . . . . . . | 30 — |
| Chlorure d'or. . . . . . . . . . . | 1 — |

Ce bain doit être préparé dès la veille, ou bien on doit le laisser exposé au soleil jusqu'à ce qu'il devienne incolore. La première épreuve qu'on y plonge n'est jamais bonne : elle sert à *faire le bain*. Quant aux autres, on les y laisse jusqu'à ce qu'elles aient pris dans les noirs une teinte violacée que l'on doit conserver expressément. Au sortir du bain de virage, on lave l'épreuve, et on fixe dans une dissolution d'hyposulfite de soude à 15 pour 100; puis on met l'épreuve comme précédemment dans l'eau pendant vingt-quatre heures. Si l'épreuve n'était pas bien lavée, elle ne se conserverait pas.

## LOUPES. — LUNETTES. — TÉLESCOPES.

541. **Loupe ou microscope simple.** — La loupe ou microscope simple consiste en une lentille biconvexe. Entre cette lentille et son foyer principal on place l'objet à examiner, et en

appliquant l'œil de l'autre côté, on aperçoit une image virtuelle droite et amplifiée de cet objet.

542. **Microscope composé.** — Dans le microscope composé réduit à sa plus simple expression, une première lentille appelée *objectif* et placée à l'entrée d'un tube en cuivre ou un système de lentilles G (fig. 377) donne à l'intérieur de ce tube une image réelle A B renversée et amplifiée de l'objet dont on veut étudier les détails. A l'autre extrémité du tube se trouve une autre lentille O appelée *oculaire*, contre laquelle on applique l'œil. On dispose les lentilles de telle sorte que l'image donnée par l'objectif vienne se former entre l'oculaire et son foyer principal. Il en résulte que l'œil placé derrière l'oculaire voit l'*image* virtuelle et amplifiée de l'*image* que fournit l'objectif, et qui est déjà plus grande que l'objet. On parvient, à l'aide de cette double cause de grossissement, à voir distinctement les détails les plus fins d'objets infiniment petits.

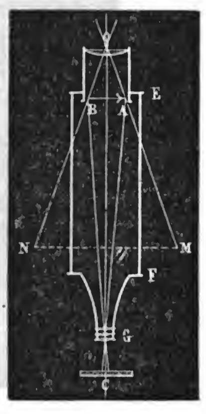


Fig. 377.

La figure 378 représente un microscope dans lequel le tube est horizontal : l'objectif est en C et les rayons qui le traversent sont réfléchis en P et renvoyés horizontalement en O sur l'oculaire. L'objet est en DD sur une plaque appelée porte-objet : cette plaque est mobile à l'aide d'un pignon et de la crémaillère F et peut être déplacée de manière à mettre l'appareil au point de l'observateur, c'est-à-dire de manière que l'image soit à la distance de la vision distincte.

543. **Lunettes et Télescopes.** — Les télescopes sont des instruments à travers lesquels les objets éloignés sont vus sous un diamètre apparent plus grand qu'à l'œil nu. On distingue les *télescopes de réfraction ou lunettes* dans lesquels on n'emploie que des lentilles, et les *télescopes catadioptriques*, nommés aussi simplement télescopes et dans lesquels il y a réflexion sur un miroir sphérique. Nous nous occuperons d'abord des lunettes.

544. **Lunette astronomique.** — La lunette astronomique destinée, comme son nom l'indique, à l'observation des astres se

compose de deux lentilles convergentes L et L′ (fig. 379) fixées aux deux extrémités d'un tube : la première L, appelée objectif,

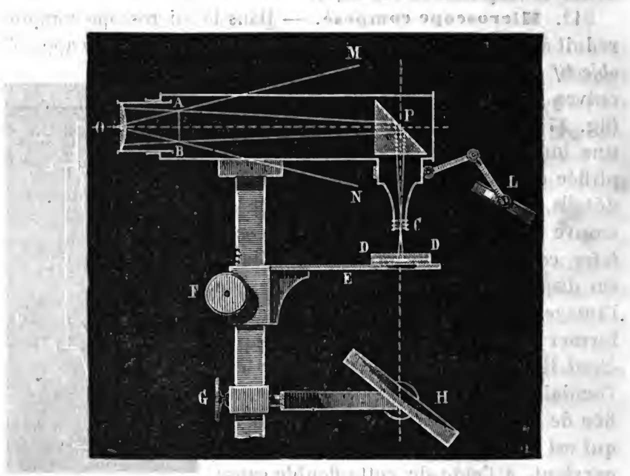



Fig. 378.

orme en A′B′ une image réelle et renversée de l'objet, et l'oculaire L′ est placée de telle sorte que cette image A′B′ vienne se former entre elle et son foyer principal. Il en résulte que, de

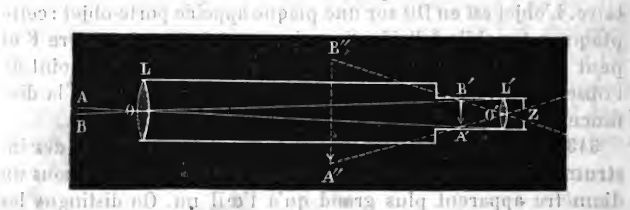



Fig. 379.

même que dans le microscope composé, l'oculaire fait l'effet de loupe par rapport à l'image A′B′ et donne en A″B″ une image agrandie mais renversée de l'astre observé.

La figure 380 représente la forme donnée à l'instrument.

545. **Lunette terrestre.** — La lunette astronomique renverse les images, ce qui est un inconvénient quand l'instrument est destiné à observer des objets terrestres. Le P. Bleita a fait

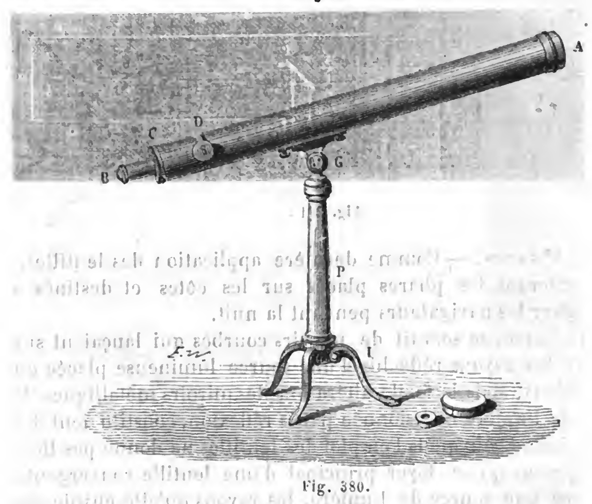


Fig. 380.

disparaître cet inconvénient en disposant deux lentilles convergentes entre l'objectif et l'oculaire. L'instrument se nomme alors *lunette d'approche* ou *longue-vue*.

546. **Lunette de Galilée.** — La lunette de Galilée montre les objets droits avec deux verres seulement. Dans cette lunette l'objectif est une lentille convergente et l'oculaire est une lentille divergente qui, recevant les rayons avant qu'ils se soient croisés au foyer de l'objectif, redresse l'image.

547. **Télescope.** — Dans les télescopes proprement dits, les images des objets éloignés sont formées par un miroir concave, qui réfléchit les rayons venus de ces objets et donne lieu à une image réelle que l'on observe avec une lentille convergente appelée oculaire qui fait fonction de loupe.

548. **Télescope de Newton.** — Dans le télescope de Newton, le seul que nous décrirons, les rayons lumineux viennent se réfléchir sur un miroir concave M (fig. 381), placé au fond d'un tube métallique ; ils iraient après réflexion former une image en

A'B' : mais, arrêtés par le miroir plan P, ils se réfléchissent prennent former en A″ B″ une image que l'oculaire L agrandit.

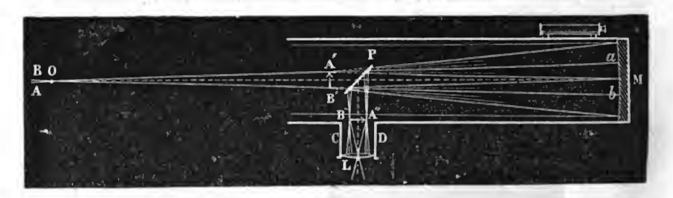



Fig. 381.

549. **Phares.** — Comme dernière application des lentilles, nous citerons les phares placés sur les côtes et destinés à renseigner les navigateurs pendant la nuit.

Autrefois on se servait de miroirs courbes qui lançaient sur la mer les rayons réfléchis d'une source lumineuse placée en avant d'eux. Mais la facile altération des miroirs métalliques, la perte de lumière occasionnée par la réflexion, constituaient des inconvénients auxquels l'emploi des lentilles ne donne pas lieu.

Supposons qu'au foyer principal d'une lentille convergente on place une source de lumière, les rayons qu'elle envoie sur cette lentille en sortiront parallèlement à l'axe et formeront un faisceau lumineux qui pourra être lancé à la surface de la mer. Tel est le principe des phares à lentilles. Mais l'emploi des lentilles ordinaires présente deux inconvénients : 1° pour que les rayons sortent parallèles à l'axe, il faut qu'à l'incidence ils ne s'écartent pas trop de l'axe, condition opposée au but que l'on veut atteindre, puisque, pour avoir un éclairage suffisant, il faut recevoir une grande quantité de rayons sur une lentille assez large ; 2° malgré la diaphanéité de la lentille il y a toujours absorption d'une certaine quantité de lumière. Fresnel par l'emploi des *lentilles à échelons* a remédié à ce double inconvénient.

Il fit construire des lentilles planes sur l'une de leurs faces (fig. 382), et présentant sur leur autre face des parties sphériques rentrantes, l'ensemble formant une lentille centrale entourée d'anneaux concentriques. L'épaisseur se trouvait ainsi diminuée et par suite l'absorption de la lumière, et les courbures des surfaces étaient disposées de telle sorte que tous les

rayons sortissent parallèles à l'axe de la lentille centrale : on pouvait ainsi avoir une grande lentille et conserver cependant le parallélisme.

La source de lumière employée est une lampe à quatre mèches concentriques pouvant s'abaisser ou s'élever indépendamment les unes des autres au moyen de pignons et de crémaillères. Une lampe de cette nature consommant 750 grammes d'huile par heure donne la lumière de 17 lampes Carcel. Placée au foyer d'une lentille à échelons, elle donne un faisceau lumineux qui peut parvenir à 12 lieues de distance et qui a le pouvoir éclairant de 4000 lampes Carcel ou de 24000 bougies.

Fig. 382.

550. **Phares à éclipses** ou **phares tournants.** Il est évident que si l'on n'employait qu'une seule lentille à échelons et qu'elle fût immobile, la lumière réfractée formerait un cylindre unique ayant pour base la lentille, et il faudrait se trouver dans sa direction pour apercevoir le phare : ce qui constituerait un inconvénient sérieux. L'emploi des feux tournants permet de lancer la lumière dans toutes les directions. On dispose, suivant une surface cylindrique dont l'axe est occupé par la source lumineuse, des lentilles à échelons formant de véritables panneaux *ll* (fig. 383), dont les foyers sont en un même point de l'axe du cylindre. Au moyen d'un mécanisme d'horlogerie le système entier tourne autour de cet axe. Il en résulte que chaque panneau promène sur toute la surface de la mer le faisceau lumineux qui l'a traversé. Un observateur placé à une certaine distance n'aperçoit la lumière du phare qu'au moment où le faisceau envoyé par un panneau vient frapper ses yeux : après cela il retombe dans l'obscurité jusqu'au moment où un nouveau panneau vient l'éclairer. On comprend qu'il en résulte pour lui de véritables éclipses et qu'en variant le nombre et la durée des éclipses, on pourra donner à chaque phare un caractère propre qui appren-

dra aux navigateurs à quel point de la côte ils se trouvent.

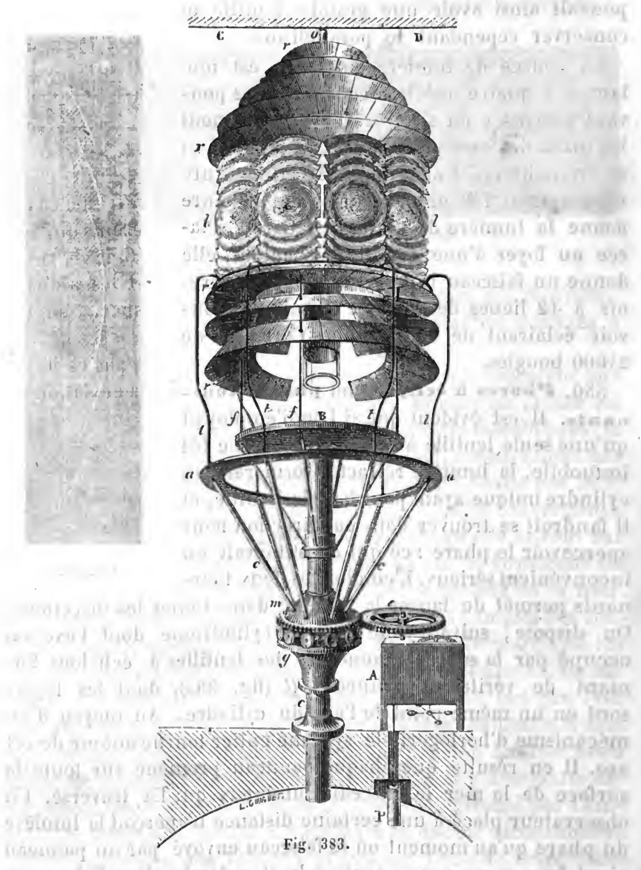


Fig. 383.

La figure 384 représente la colonne en maçonnerie au sommet de laquelle se trouve disposé l'appareil d'éclairage.

551. **Phares à feux fixes.** — Les phares à feux fixes sont formés par une seule lentille à échelons ayant extérieurement la forme d'un cylindre. Il en résulte que la lumière, au lieu d'être

projetée dans un petit nombre de directions comme pour les

Fig. 384.

panneaux, est lancée dans tous les sens suivant une nappe horizontale et par suite a une intensité beaucoup plus faible.

FIN

MAG 20051

VITTORIO
EMANUELE
BIBLIOTECA
IN ROMA

# TABLE DES MATIÈRES

Notions préliminaires ........ 1
Propriétés générales des corps ........ 3

## LIVRE I

### PESANTEUR ET HYDROSTATIQUE

Chapitre I. — Pesanteur. — Centre de gravité. — Mesure des poids. Balances.

Pesanteur. Sa direction. Verticale. Horizontale ........ 11
Niveau ........ 12
Lois de la chute des corps ........ 13
Intensité de la pesanteur ........ 15
Centre de gravité ........ 16
Équilibre d'un corps pesant sur un plan horizontal ........ 18
Pendule. Son application aux horloges ........ 19
Mesure des poids. Balances ........ 23

Chapitre II. — Notions sur les divers états des corps.

Solides ........ 35
Liquides ........ 37
Gaz ........ 39

Chapitre III. — Hydrostatique.

Principe d'égalité de pression ........ 40
Principe de Pascal ........ 41
Presse hydraulique ........ 42
Conditions d'équilibre des liquides pesants ........ 43
Pressions exercées sur le fond des vases ........ 45
Pressions latérales ........ 46
Vases communiquants ........ 49
Applications. — Jets d'eau. Puits artésiens. Niveau d'eau. Lampes. Écluses. 50
Principe d'Archimède ........ 56
Corps flottants. Ludion. Bateaux ........ 59
Fluides superposés. Niveau à bulle d'air ........ 63

Chapitre IV. — Densités ou poids spécifiques.

Détermination des densités ........ 65
Méthode de la balance hydrostatique ........ 66
Méthode du flacon ........ 67

Aréomètres à poids variable et à volume constant de Nicholson et de Fahrenheit........ 68
Aréomètres à poids constant et à volume variable........ 70
Alcoomètre de Gay-Lussac........ 71

CHAPITRE V. — PESANTEUR DES GAZ. — PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — BAROMÈTRES.

Transmission des pressions par les gaz........ 73
Pesanteur des gaz........ 74
Pression atmosphérique........ 75
Effets de la pression atmosphérique........ 79
Baromètres........ 83

CHAPITRE VI. — COMPRESSIBILITÉ DES GAZ. — LOI DE MARIOTTE. — MANOMÈTRES.

Loi de Mariotte........ 90
Manomètres........ 93

CHAPITRE VII. — MACHINE PNEUMATIQUE. — MACHINE DE COMPRESSION. POMPES. — SIPHONS.

Machine pneumatique........ 97
Machine de compression........ 105
Fontaine de compression........ 106
Fontaine de Héron........ 107
Fusil à vent. Soufflets. Machines soufflantes........ 107
Pompes........ 110
Siphons........ 116
Fontaines intermittentes........ 118

CHAPITRE VIII. — EXTENSION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE AU GAZ. — AÉROSTATS. — MÉLANGE DES GAZ. — MÉLANGE DES GAZ ET DES LIQUIDES.

Extension du principe d'Archimède aux gaz........ 121
Aérostats........ 122
Mélange des gaz........ 125
Dissolution des gaz dans les liquides........ 126

# LIVRE II

## CHALEUR

CHAPITRE I. — DILATABILITÉ DES CORPS. — MESURE DES TEMPÉRATURES. — THERMOMÈTRES.

Température........ 131
Dilatabilité des corps par la chaleur........ 132
Thermomètre........ 135
Thermomètre à mercure. Sa construction et sa graduation........ 137
Unité de température........ 141
Diverses échelles thermométriques........ 141
Thermomètre à alcool........ 142
Thermomètres à minima et à maxima de Ruterford........ 143
Thermométrographe de Six et Bellani........ 144
Pyromètres de Brongniart et de Wegwood........ 145

CHAPITRE. II. — APPLICATIONS DE LA DILATATION DES CORPS.

Définition des coefficients de dilatation. Applications diverses ............... 146
Pendules compensateurs ............................................... 149
Maximum de densité de l'eau .......................................... 150

CHAPITRE III. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — FUSION. — SOLIDIFICATION. — VAPORISATION.

Lois de la fusion .................................................... 152
Chaleur latente de fusion ............................................ 153
Dissolution .......................................................... 154
Mélanges réfrigérants ................................................ 156
Cristallisation ...................................................... 157
Lois de la solidification ............................................ 157
Vaporisation ......................................................... 159
Liquéfaction des vapeurs et des gaz .................................. 161
Appareils Carré ...................................................... 162

CHAPITRE IV. — FORMATION ET PROPRIÉTÉS DES VAPEURS. — MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

Les vapeurs suivent-elles la loi de Mariotte? ........................ 165
Vapeurs saturantes. Tensions maximum ................................. 166

CHAPITRE V. — ÉVAPORATION. — ÉBULLITION.

Évaporation. Des causes qui influent sur sa rapidité ................. 170
Ébullition ; ses lois ................................................ 171
Distillation ......................................................... 175

CHAPITRE VI. — PROPAGATION DE LA CHALEUR. — CONDUCTIBILITÉ. — RAYONNEMENT — CALORIMÉTRIE.

Conductibilité; ses applications ..................................... 177
Chaleur rayonnante ................................................... 180
Émission de la chaleur rayonnante .................................... 181
Réflexion de la chaleur rayonnante ................................... 183
Diffusion, transmission, absorption de la chaleur rayonnante ......... 184
Chaleur spécifique ................................................... 186

CHAPITRE VII. — CHAUFFAGE ET VENTILATION DES APPARTEMENTS. — MACHINES A VAPEUR.

Cheminées ............................................................ 189
Poêles ............................................................... 191
Calorifères à air chaud .............................................. 192
Calorifères à circulation d'eau chaude ............................... 192
Chauffage à la vapeur ................................................ 195
Machines à vapeur .................................................... 195
Machine de Newcommen ................................................. 196
Machine à vapeur de Watt à simple effet .............................. 198
Machine à vapeur de Watt à double effet .............................. 199
Classification des machines à vapeur ................................. 206
Chaudières ........................................................... 206
Bateaux à vapeur. Locomotives ........................................ 210

CHAPITRE VIII. — MÉTÉOROLOGIE. — DISTRIBUTION DE LA CHALEUR A LA SURFACE DU GLOBE.

Température de l'air.......... 214
Saisons météorologiques.......... 216
Vents.......... 217
Hygrométrie.......... 218
Hygromètre de Saussure.......... 219
Brouillards.......... 222
Nuages.......... 222
Pluie.......... 224
Serein, verglas, neige.......... 224
Grésil, grêle, rosée.......... 226
Givre ou gelée blanche.......... 229
Indications du baromètre.......... 230

# LIVRE III

## ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

### ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

Phénomènes généraux. Corps conducteurs, corps isolants.......... 233
Des deux espèces d'électricité.......... 236

CHAPITRE II. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS.

L'électricité se porte à la surface des corps.......... 241
Pouvoir des pointes.......... 241

CHAPITRE III. — DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ. — ÉLECTROSCOPE. — MACHINES ÉLECTRIQUES.

Électricité par influence.......... 243
Étincelle électrique.......... 245
Électroscopes.......... 248
Machines électriques.......... 250
Électrophore.......... 256

CHAPITRE IV. — CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ. — BOUTEILLES DE LEYDE. — BATTERIES ÉLECTRIQUES.

Condensation de l'électricité.......... 258
Décharges successives, décharge instantanée du condensateur.......... 260
Bouteille de Leyde.......... 261
Batteries électriques.......... 262

CHAPITRE V. — EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ.

Effets physiologiques.......... 264
Effets mécaniques.......... 265
Effets calorifiques.......... 267
Effets lumineux.......... 269
Effets chimiques.......... 771

### CHAPITRE VI. — ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Éclair.... 274
Tonnerre.... 277
Influence des nuages orageux sur des objets situés à la surface du sol. — Choc en retour.... 278
Des précautions à prendre en temps d'orage.... 286
Paratonnerres.... 287

### CHAPITRE VII. — MAGNÉTISME.

Aimants naturels, artificiels.... 289
Direction des aimants par la terre. — Pôles.... 290
Action des aimants sur le fer doux, sur l'acier.... 292
Procédés d'aimantation.... 293
Boussoles.... 296

## ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE OU VOLTAIQUE.

### CHAPITRE VIII. — DESCRIPTION DES PRINCIPALES ESPÈCES DE PILES.

Phénomènes fondamentaux sur lesquels repose le jeu de piles.... 300
Pile de Volta.... 301
Piles à auges.... 304
Pile de Munch.... 306
Piles à deux liquides de Daniell, de Bunsen.... 307

### EFFETS DE LA PILE.

Effets physiologiques.... 309
Effets physiques.... 310
Effets chimiques.... 313
Galvanoplastie. Dorure et argenture galvanique.... 316

### CHAPITRE IX. — ACTION D'UN COURANT SUR LES AIMANTS. — GALVANOMÈTRE. — AIMANTATION PAR LES COURANTS. — TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

Expérience d'Œrstedt. Loi d'Ampère.... 324
Galvanomètre.... 325
Aimantation par les courants.... 328
Télégraphes électriques.... 331
Télégraphe de M. Morse.... 336
Télégraphe de M. Bréguet.... 340

### CHAPITRE X. — INDUCTION.

Induction par les courants.... 349
Induction par les aimants.... 350
Bobine de M. Ruhmkorff.... 350
Machine de Clarkes.... 353

# LIVRE IV

## ATTRACTION MOLÉCULAIRE — ACOUSTIQUE

### CHAPITRE I. — ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

Attraction moléculaire. Cohésion. Adhésion.... 356
Phénomènes capillaires.... 357

CHAPITRE II. — PRODUCTION, PROPAGATION, VITESSE DU SON.

Vibrations des corps sonores .......... 359
Le son ne se propage pas dans le vide .......... 361
Mode de propagation du son .......... 362
Réflexion du son. Échos .......... 364
Vitesse du son .......... 365

CHAPITRE III — QUALITÉS DU SON. — INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME. — INSTRUMENTS DE MUSIQUE.

Intensité, gravité, acuïté des sons .......... 368
Mesure du nombre de vibrations correspondant à un son donné .......... 369
Intervalles musicaux. Gamme .......... 370
Timbre des sons .......... 372
Instruments à cordes .......... 373
Tuyaux sonores .......... 374
Instruments à vent .......... 376
De la voix .......... 377
De l'oreille .......... 379

# LIVRE V

## OPTIQUE

CHAPITRE I. — LUMIÈRE. — SA PROPAGATION. — OMBRES. CHAMBRE OBSCURE. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

Corps opaques, diaphanes, transparents, colorés, translucides .......... 382
La lumière se propage en ligne droite. Ombre. Pénombre .......... 383
Images dans la chambre obscure .......... 385
Vitesse de la lumière .......... 386

CHAPITRE II. — RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE. — MIROIRS. — RÉFRACTION. — PRISMES. LENTILLES. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

Lois de la réflexion de la lumière .......... 386
Miroirs .......... 390
Réfraction de la lumière .......... 395
Prismes. Lentilles .......... 400

CHAPITRE III. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE. — LANTERNE MAGIQUE. — CHAMBRE NOIRE. ŒIL. — PHOTOGRAPHIE. — MICROSCOPES. — LUNETTES. — TÉLESCOPES. — PHARES.

Lanterne magique. Microscope solaire .......... 408
Chambre noire .......... 410
Œil .......... 410
Photographie .......... 413
Loupe .......... 422
Microscope composé .......... 423
Lunettes .......... 423
Télescopes .......... 423
Phares .......... 426

CORBEIL, typ. et stér. de CRÉTÉ FILS.

Digitized by Google